



VALIDAÇÃO DE DADOS MODIS USANDO RADIOSSONDAGEM E REANÁLISE  
PARA PERFILAGEM ATMOSFÉRICA NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

Louise Caroline Carvalho dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho  
Daniel Medeiros Moreira

Rio de Janeiro  
Novembro de 2022

VALIDAÇÃO DE DADOS MODIS USANDO RADIOSSONDAGEM E REANÁLISE  
PARA PERFILAGEM ATMOSFÉRICA NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

Louise Caroline Carvalho dos Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho  
Daniel Medeiros Moreira

Aprovada por: Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho  
Dr. Daniel Medeiros Moreira  
Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo  
Prof. Daniel Andrés Rodriguez  
Prof. Fabricio Polifke da Silva  
Prof. Wanderson Luiz Silva

Rio de Janeiro, RJ - Brasil  
Novembro de 2022

Dos Santos, Louise Caroline Carvalho

Validação de dados MODIS usando radiossondagem e reanálise para perfilagem atmosférica na cidade do Rio de Janeiro / Louise Caroline Carvalho dos Santos – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XX, 117 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Daniel Medeiros Moreira

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Civil, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 102-114

1. Hidrometeorologia. 2. Dados MODIS. 3. Radiossondagem. 4. Reanálise 5. Perfil atmosférico. 6. Cidade do Rio de Janeiro I. Rotunno Filho, Otto Corrêa *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*“...Mudanças  
Vire-se e encare o estranho  
Mudanças  
Não quero ser uma mulher mais rica  
Mudanças  
Vire-se e encare o estranho  
Mudanças  
Só tenho que ser uma mulher diferente  
O tempo pode me mudar  
Mas eu não posso enganar o tempo...”*

Modificado de “Changes”, música original de David Bowie.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que, com sua infinita graça, tem me guardado e cuidado desde os meus primeiros momentos de vida.

Agradeço à minha querida mãe, Geise Maria de Carvalho, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado durante todos os momentos, sendo eles bons ou ruins. Agradeço a ela pela educação que me foi dada e pelo exemplo de mulher que ela é em minha vida.

Agradeço ao meu pai, Marcelo Luiz dos Santos, por me ensinar a ser segura de mim, por me ensinar a não ter medo de trabalhar duro e a lutar pelos meus objetivos.

Gostaria de agradecer também aos queridos mestres que participaram da vida minha acadêmica desde o CEFET/RJ até a COPPE/UFRJ.

Agradeço aos mestres e doutores do Departamento de Meteorologia da UFRJ, que me introduziram ao mundo acadêmico, especialmente à minha orientadora Claudine Pereira Dereczynski, que foi essencial na minha formação acadêmica.

Agradeço aos orientadores deste trabalho, Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho e Dr. Daniel Medeiros Moreira, pela supervisão e pelo acompanhamento do desenvolvimento da pesquisa. Também agradeço ao auxílio e orientação complementar do Dr. William Cossich na análise dos dados aqui utilizados.

Agradeço, também, aos professores da COPPE/UFRJ, que me levaram a dar passos ainda maiores na minha formação. Agradecimentos são extensivos ao corpo técnico-administrativo da COPPE/UFRJ.

Registra-se que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Adicionalmente, agradecimento especial é dirigido ao CNPq, que disponibilizou bolsa de mestrado como suporte ao desenvolvimento desta dissertação.

Agradecimentos extensivos são dirigidos aos órgãos que disponibilizam informações hidrometeorológicas, que permitiram que o presente trabalho tenha sido concebido e desenvolvido.

Complementarmente, em nome do Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABH2O) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, agradeço às agências de fomento FAPERJ e CNPq, que, por meio de suporte ao projeto PEC/COPPE FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2024) – E-26/010.002980/2014, bem como aos projetos CNPq Edital Universal No. 28/2018 – Processo 435714/2018-0, CNPq Edital nº 12/2016 – Processo 306944/2016-2 e CNPq Edital nº 06/2019 – Processo 303846/2019-4, entre outros, estimulam o avanço científico-tecnológico brasileiro na temática que abrange o escopo desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, de forma mais próxima ou indiretamente, apoiaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

VALIDAÇÃO DE DADOS MODIS USANDO RADIOSSONDAGENS E  
REANÁLISE PARA PERFILAGEM ATMOSFÉRICA NA CIDADE DO RIO DE  
JANEIRO

Louise Caroline Carvalho dos Santos

Novembro/2022

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Daniel Medeiros Moreira

Programa: Engenharia Civil

O uso de produtos de sensoriamento remoto tem sido amplamente explorado desde meados do século XX. A praticidade, confiabilidade e disponibilidade global desse tipo de dado justificam seu emprego na utilização no campo da hidrometeorologia. As informações de satélite têm sido essenciais no estudo da atmosfera em lugares de difícil acesso e importante complemento ao uso de dados *in situ*. Tratando-se da atmosfera local da cidade do Rio de Janeiro, existe um longo histórico de desastres associados à chuva intensa. Por outro lado, a escassez de chuva também provoca danos ao meio ambiente e impacta a sociedade. O estudo da relação superfície-atmosfera associada a tais eventos é essencial para a previsão e o alerta bem como para o desenvolvimento de estudos climatológicos. Nesse contexto, o presente trabalho investiga o uso de produtos de satélites em contraste com dados de radiossondagem e de reanálise oriundas do modelo ECMWF na análise de perfis atmosféricos locais sobre a cidade do Rio de Janeiro. A área de estudo foi dividida em dois pontos centrais situados no Aeroporto Internacional do Galeão e Ilha do Fundão. O produto MOD07 foi avaliado em um período de 10 anos (2011-2020) e também posto à prova mediante a aplicação em dois estudos de caso de chuva intensa. Os resultados indicaram correlação linear acima de 0,57 entre as fontes de dados para a temperatura do ar. Complementarmente, embora tenha sido identificada certa limitação do produto MOD07 em estimar o vapor de água presente na atmosfera local, visto que os resultados com variáveis ligadas ao vapor de água mostraram algumas discrepâncias, observou-se o seu bom desempenho quanto a sua regularidade de disponibilizar a informação com algum grau de confiabilidade. Assim, julga-se bastante oportuno explorar o emprego de produtos satelitais no exame de perfis atmosféricos no contexto do monitoramento e da modelagem hidrometeorológica.

Abstract of the Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MODIS DATA VALIDATION USING RADIOSOUNDING AND REANALYSIS  
FOR ATMOSPHERIC PROFILE IN THE CITY OF RIO DE JANEIRO

Louise Caroline Carvalho dos Santos

November/2022

Advisors: Otto Corrêa Rotunno Filho  
Daniel Medeiros Moreira

Department: Civil Engineering

Remote sensing products have been widely explored since the mid-20th century. The practicality, reliability and global availability of such datasets justify their use in hydrometeorology. Satellite information has been essential to address atmosphere in places of difficult access and an important complement to the use of *in situ* data. In terms of the local atmosphere of the city of Rio de Janeiro, there is a long history of disasters associated with heavy rain. On the other hand, droughts also cause damage and impact society. To study the surface–atmosphere relationship associated with such events is essential for prediction and warning as well as for the development of climatological studies. Under such framework, this work investigates the use of products from satellites in contrast to radiosondes and to the global hydrometeorological reanalysis datasets from the model ECMWF in the analysis of local atmospheric profiles over the city of Rio de Janeiro. The study area encompasses Galeão International Airport and Ilha do Fundão. The satellite product MOD07 was evaluated along a 10-year time span (2011–2020) and further applied to two rainy events. The results indicated linear correlation over 0,57 among the different data sources for air temperature. In addition, although MOD07 product proved to be limited in understanding the water vapor present in the local atmosphere due to discrepancies in some results, its good performance was observed in terms of its regularity of providing the information with some degree of reliability. Therefore, the use of satellite products in the examination of atmospheric profiles in the context of monitoring and hydrometeorological modeling is considered quite opportune.

## SUMÁRIO

	<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>xi</b>
	<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xv</b>
	<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1.	Considerações iniciais	1
1.2.	Formulação do problema	3
1.3.	Antecedentes históricos de pesquisa	5
1.4.	Objetivos – geral e específicos	7
1.5.	Contribuição da pesquisa	7
1.6.	Estrutura do trabalho	8
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>11</b>
2.1.	Radiossondagem e estudo da atmosfera	11
2.2.	Reanálise ECMWF - ERA 5	20
2.3.	Produtos do sensor MODIS	24
2.4.	Análise do perfil atmosférico vertical com produtos do MODIS e produtos de outros satélites	26
2.5.	Limitações do sensoriamento remoto	31
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>34</b>
3.1.	Radiossondagens	35
3.2.	Produto MOD07_L2 e limitações	36
3.4.	ECMWF - ERA 5	39
3.5.	Água Precipitável	40
3.6.	Avaliação do desempenho do MOD07_L2	40
3.6.1.	Avaliação estatística da assertividade das temperaturas	40
3.6.2.	Avaliação quantitativa e estatística da assertividade dos índices de instabilidade	42
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE RADIOSSONDAGENS</b>	<b>46</b>
4.1.	MODIS versus sondagens GIG (2011 – 2020)	46
4.2.	Curvas de PW	48
4.2.1.	Normalizações de PW e PW mínimo	50
4.2.2.	Investigando PW máximo, médio e mínimo	55
4.3.	Análises nas nove regiões	63
4.4.	Comparações MODIS e Reanálise	65
4.5.	Curvas de PW MODIS, Sondagens e Reanálise	68

4.6.	MODIS versus sondagens Fundão	<b>69</b>
4.6.1.	Comparação entre os índices TT, K e LI obtidos pela radiossondagem e pelo produto do MODIS sobre a Ilha do Fundão	<b>71</b>
4.7.	Comparação entre radiossondagens sobre o Galeão e o produto do MODIS	<b>73</b>
4.7.1.	Comparação entre os índices TT, K e LI obtidos pela radiossondagem e pelo produto do MODIS sobre o Galeão	<b>75</b>
4.8.	Limitações do estudo	<b>79</b>
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>ESTUDO DE CASO DE CHUVA INTENSA COM RADIOSSONDAGEM</b>	<b>82</b>
5.1.	Estudo do caso de chuva intensa sobre o município do Rio de Janeiro de 24/04/2011 a 26/04/2011	<b>82</b>
5.1.1.	Imagens de satélite e acumulados de chuva	<b>82</b>
5.1.2.	Produto MODIS, radiossondagem e reanálise no dia 25/04/2011	<b>84</b>
5.1.3.	PW em 25/04/2011	<b>87</b>
5.2.	Estudo do caso de chuva intensa sobre o município do Rio de Janeiro de 14/02/2018 a 15/02/2018	<b>87</b>
5.2.1.	Imagens de satélite e acumulados de chuva	<b>88</b>
5.2.2.	Produto MODIS, radiossondagem e reanálise no dia 15/02/2018	<b>89</b>
5.2.3.	PW em 15/02/2018	<b>93</b>
5.3.	Síntese dos resultados das análises de caso	<b>93</b>
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>96</b>
6.1.	Considerações finais	<b>96</b>
6.2.	Conclusões	<b>97</b>
6.3.	Recomendações	<b>99</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>Extração de Dados do MODIS com a Ferramenta MCTK</b>	<b>115</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Sensores responsáveis pela leitura dos dados em altitude. Lançamento de radiossondagem. Fonte: <a href="http://www.vaisala.com">http://www.vaisala.com</a> .	<b>12</b>
<b>Figura 2.2</b>	Lançamento ilustrativo de radiossondagem em 13/02/2017 no Instituto de Geociências – UFRJ Campus Ilha do Fundão.	<b>13</b>
<b>Figura 2.3</b>	Diagramas Skew-T para SGBL nos seguintes horários: (a) 12000 UTC 12/12/2016; (b) 16000 UTC 12/12/2016; (c) 1800 UTC 12/12/2016; (d) 0000 UTC 13/12/2016. Fonte: Polifke et al. (2017).	<b>17</b>
<b>Figura 2.4</b>	Diagrama Skew-T para SBGL às 0000 UTC do dia 18/03 de 2013. Fonte: Andrade et al. (2015).	<b>19</b>
<b>Figura 2.5</b>	Comparações entre reanálises e radiossondagens sobre o deserto central de Taclamacã – China com as variáveis T, Q, GPH, U e V usando as seguintes métricas estatísticas: (a) RMSE; (b) correlação; (c) erro médio. Fonte: Huang et al. (2021).	<b>21</b>
<b>Figura 2.6</b>	Resultados de perfis atmosféricos sobre a região amazônica com diferentes fontes: (a) temperatura do ar (°C), (b) bias, RMSE e correlação entre diferentes fontes e radiossondagens. Fonte: Da Costa et al. (2008).	<b>27</b>
<b>Figura 2.7</b>	Regiões de estudo Yang et al. (2020). Fonte: Yang et al. (2020).	<b>30</b>
<b>Figura 3.1</b>	Esquema do fluxograma metodológico com as etapas do trabalho.	<b>35</b>
<b>Figura 3.2</b>	Imagens de satélite no dia 18/11/2016: (a) sensor MODIS no satélite Terra; (b) Goes-13 canal infravermelho. Fonte: NASA e CPTEC/INPE.	<b>38</b>
<b>Figura 3.3</b>	Recorte dos píxeis dos dados MODIS com aplicação de uma matriz 3 X 3 e resolução espacial de 5,0 km para cada píxel sobre a região de interesse.	<b>39</b>
<b>Figura 3.4</b>	Fluxograma para confecção da tabela de contingência binária quanto às condições atmosféricas para ocorrência ou não de chuva e estimativas do MODIS.	<b>44</b>
<b>Figura 4.1</b>	PW (mm) calculada com informações das sondagens do Galeão (azul) e MODIS (vermelho).	<b>48</b>
<b>Figura 4.2</b>	Dispersão dos valores de PW (mm) obtidos pelo MODIS em contraste com as sondagens GIG.	<b>49</b>
<b>Figura 4.3</b>	PW calculada com informações das sondagens do Galeão (azul) e PW calculada com Td mínimo do MODIS sobre a região estudo (vermelho).	<b>50</b>
<b>Figura 4.4</b>	PW calculada com informações das sondagens do Galeão (azul) e PW MODIS (vermelho) normalizada pela Equação 4.1.	<b>52</b>

<b>Figura 4.5</b>	PW calculada com informações das sondagens do Galeão (azul) e PW MODIS (vermelho) normalizada pela Equação 4.2.	<b>52</b>
<b>Figura 4.6</b>	Resultados estatísticos das diferentes abordagens para estimativa de PW: (a) correlação, (b) RMSE, (c) BIAS e (d) KGE.	<b>53</b>
<b>Figura 4.7</b>	Perfis atmosféricos no dia de PW máximo (31/01/2019): (a) perfil atmosférico pelos valores médios do MODIS; (b) perfil atmosférico pela sondagem GIG; (c) perfil atmosférico por valores mínimos do MODIS.	<b>56</b>
<b>Figura 4.8</b>	Imagens de satélite em 31/01/2019: (a) GOES-16 às 1200 UTC; (b) TERRA às 1300 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.	<b>57</b>
<b>Figura 4.9</b>	Perfis atmosféricos no dia de PW médio (21/04/2011): (a) perfil atmosférico pelos valores médios do MODIS; (b) perfil atmosférico pela sondagem GIG; (c) perfil atmosférico por valores mínimos do MODIS.	<b>58</b>
<b>Figura 4.10</b>	Imagens de satélite em 21/04/2011: (a) METEOSAT às 1200 UTC; (b) TERRA às 1228 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.	<b>59</b>
<b>Figura 4.11</b>	Perfis atmosféricos no dia de PW mínimo (27/09/2012): (a) perfil atmosférico pelos valores médios do MODIS; (b) perfil atmosférico pela sondagem GIG; (c) perfil atmosférico por valores mínimos do MODIS.	<b>60</b>
<b>Figura 4.12</b>	Imagens de satélite em 27/09/2012: (a) METEOSAT às 1200 UTC; (b) TERRA às 1228 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.	<b>62</b>
<b>Figura 4.13</b>	Posição dos 9 (nove) píxeis de extração das informações do MODIS.	<b>63</b>
<b>Figura 4.14</b>	Informações dos perfis atmosféricos pelo MODIS nas nove (9) diferentes regiões (cores) em contraste com os perfis atmosféricos da sondagem GIG (vermelho) coletados em (a) 31/01/2019, (b) 21/04/2011 e (c) 27/09/2012.	<b>64</b>
<b>Figura 4.15</b>	PW (mm) calculada com informações das sondagens do Galeão (azul), do MODIS (vermelho) e do ECMWF (amarelo).	<b>68</b>
<b>Figura 4.16</b>	Dispersão de PW MODIS (mm) versus PW ECMWF (mm).	<b>69</b>
<b>Figura 4.17</b>	Perfil atmosférico em 17/11/2016 sobre o Fundão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).	<b>70</b>
<b>Figura 4.18</b>	Perfil atmosférico em 13/02/2017 sobre o Fundão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).	<b>70</b>
<b>Figura 4.19</b>	Perfil atmosférico em 15/03/2018 sobre o Fundão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).	<b>71</b>

<b>Figura 4.20</b>	Valores dos índices de instabilidade TT, K e LI sobre o Fundão obtidos pela radiossondagem (amarelo) e obtidos pelo produto do MODIS (azul) em: (a) 17/11/2016; (b) 13/02/2017; (c) 15/03/2018.	<b>72</b>
<b>Figura 4.21</b>	Perfil atmosférico em 17/11/2016 sobre o Galeão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).	<b>74</b>
<b>Figura 4.22</b>	Perfil atmosférico em 13/02/2017 em sobre o Galeão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).	<b>74</b>
<b>Figura 4.23</b>	Perfil atmosférico em 15/03/2018 sobre o Galeão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).	<b>75</b>
<b>Figura 4.24</b>	Valores dos índices de instabilidade TT, K e LI sobre o Galeão obtidos pela radiossondagem (amarelo) e obtidos pelo produto do MODIS (azul) em: (a) 17/11/2016; (b) 13/02/2017 e (c) 15/03/2018.	<b>76</b>
<b>Figura 5.1</b>	Imagens do satélite GOES-12 no canal infravermelho com temperatura de topo das nuvens (°C): (a) 2200 UTC 25/04/2011, (b) 0000 UTC 26/04/2011, (c) 0200 UTC 26/04/2011, (d) 0400 UTC 26/04/2011, (e) 0600 UTC 26/04/2011, (f) 0800 UTC 26/04/2011, (g) 1000 UTC 26/04/2011 e (h) 1200 UTC 26/04/2011. Fonte: CPTEC/INPE.	<b>83</b>
<b>Figura 5.2</b>	Perfil atmosférico em 25/04/2011 sobre o Galeão (1200 UTC) por radiossondagem, produto MODIS (1320 UTC) e reanálise ECMWF: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).	<b>84</b>
<b>Figura 5.3</b>	Perfis atmosféricos de T e Td em 25/04/2011 sobre o Galeão (1200 UTC) por radiossondagem e pelo produto MODIS (1320 UTC): (a) radiossondagem, (b) MODIS e (c) reanálise ECMWF.	<b>85</b>
<b>Figura 5.4</b>	Valores dos índices de instabilidade TT, K e LI sobre o Galeão obtidos pela radiossondagem (azul), MODIS (vermelho) e reanálise ECMWF (amarelo) em 25/04/2011.	<b>86</b>
<b>Figura 5.5</b>	Imagens do satélite GOES-16 no canal infravermelho com temperatura de topo das nuvens (°C): (a) 2300 UTC 14/02/2018, (b) 0000 UTC 15/02/2018, (c) 0100 UTC 15/02/2018, (d) 0200 UTC 15/02/2018, (e) 0300 UTC 15/02/2018, (f) 0400 UTC 15/02/2018, (g) 0500 UTC 15/02/2018 e (h) 0600 UTC 15/02/2018. Fonte: CPTEC/INPE.	<b>88</b>
<b>Figura 5.6</b>	Perfil atmosférico em 15/02/2018 sobre o Galeão (1200 UTC) por radiossondagem, produto MODIS (1320 UTC) e reanálise ECMWF: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).	<b>90</b>
<b>Figura 5.7</b>	Perfis atmosféricos de T e Td em 15/02/2018 sobre o Galeão (1200 UTC) por radiossondagem e pelo produto MODIS (1320 UTC): (a) radiossondagem, (b) MODIS e (c) reanálise ECMWF.	<b>91</b>
<b>Figura 5.8</b>	Valores dos índices de instabilidade TT, K e LI sobre o Galeão obtidos pela radiossondagem (azul), MODIS (vermelho) e reanálise ECMWF (amarelo) em 15/02/2018.	<b>92</b>

<b>Figura A1</b>	Extração e conversão dos dados HDF em DAT com a ferramenta MCTK.	<b>115</b>
<b>Figura A2</b>	Bandas extraídas do produto do MODIS.	<b>115</b>
<b>Figura A3</b>	Índices de instabilidade pré-calculados do produto do MODIS.	<b>116</b>
<b>Figura A4</b>	Região da baía de Guanabara e seu entorno, com detalhamento da Ilha do Fundão (linha de contorno em vermelho) e do aeroporto do Galeão (linha de contorno em verde).	<b>116</b>
<b>Figura A5</b>	Leitura dos valores diretamente dos píxeis sobre a região de interesse.	<b>117</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b>	Índices de instabilidade atmosférica.	<b>14</b>
<b>Tabela 2.2</b>	Especificações de banda infravermelha MODIS: largura de banda ( $\mu\text{m}$ ), radiância espectral ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ) e diferença de temperatura equivalente ao ruído - $\text{NE}[\Delta]T$ (K). Fonte: <a href="https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php">https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php</a> e Borbas et al. (2006).	<b>25</b>
<b>Tabela 2.3</b>	Resultados de RMSE entre MODIS e sondagens antes e depois da aplicação de procedimento de duas etapas. Fonte: Rahimzadegan e Mobasher (2010).	<b>28</b>
<b>Tabela 2.4</b>	Comparação de ERA-Interim versus Sondagens e ERA-Interim versus MODIS. Fonte: Bungtong et al. (2020).	<b>30</b>
<b>Tabela 3.1</b>	Datas das radiossondagens lançadas e as condições atmosféricas observadas nos respectivos dias. Fonte: Silva (2019).	<b>36</b>
<b>Tabela 3.2</b>	Tabela de contingência.	<b>42</b>
<b>Tabela 3.3</b>	Valores limítrofes para índices de instabilidade. Fonte: Nascimento (2005).	<b>44</b>
<b>Tabela 4.1</b>	Estatísticas MODIS versus Sondagens: (a) temperatura do ar; (b) temperatura do ponto de orvalho.	<b>46</b>
<b>Tabela 4.2</b>	Estatísticas de PW em diferentes partes da atmosfera.	<b>49</b>
<b>Tabela 4.3</b>	Estatísticas MODIS versus sondagens da temperatura do ponto de orvalho.	<b>51</b>
<b>Tabela 4.4</b>	PW calculado com $T_d$ , valor mínimo e normalizações de PW calculado com $T_d$ médio.	<b>54</b>
<b>Tabela 4.5</b>	Dias com valores de PW máximo, médio e mínimo de 2011 - 2020 a partir das sondagens do Galeão.	<b>55</b>
<b>Tabela 4.6</b>	Estatísticas MODIS versus reanálise: (a) temperatura do ar; (b) temperatura do ponto de orvalho.	<b>66</b>
<b>Tabela 4.7</b>	Síntese dos resultados obtidos para T e $T_d$ entre as radiossondagens e o produto do MODIS.	<b>78</b>
<b>Tabela 4.8</b>	Síntese dos resultados obtidos para os índices TT, K e LI.	<b>78</b>

<b>Tabela 5.1</b>	PW, NPW e XPW calculados com informações do MODIS, sondagem GIG e reanálise ECMWF em 25/04/2011.	<b>87</b>
<b>Tabela 5.2</b>	PW, NPW e XPW calculados com informações do MODIS, sondagem GIG e reanálise ECMWF em 15/02/2018.	<b>93</b>
<b>Tabela 5.3</b>	Resultados da comparação entre radiossondagem e MODIS e entre radiossondagem e reanálise EMCWF nos dias 25/04/2011 e 18/02/2028.	<b>94</b>
<b>Tabela 5.4</b>	Síntese dos resultados obtidos para os índices TT, K e LI nos dois estudos de caso.	<b>94</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AB	Anticiclone da Bolívia
AC	Acurácia
AIRS	<i>Atmospheric Infrared Sounder</i> – Sensor Infravermelho Atmosférico
AMSR-E	<i>Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS</i> – Radiômetro Escaneador de Micro-ondas Avançado para EOS
AMSU-A	<i>Advanced Microwave Sounding Unit</i> – Unidade de Sondagem em Micro-ondas Avançada
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> - Radiômetro Termal de Emissão e Reflexão
ATMS	<i>Advanced Technology Microwave Sounder</i> – Sensor de Micro-ondas de Tecnologia Avançada
BRAMS	<i>Brazilian Regional Atmospheric Modeling System</i> – Sistema de Modelagem Atmosférica Regional Brasileiro
CAPE	Energia Potencial Convectiva Disponível
CERES	<i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i> – Sistema de Energia Radiante das Nuvens e da Terra
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data</i>
CIN/CINE	Índice de Inibição Convectiva
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CrIS	<i>The Cross-Track Infrared Sounder</i> – Sensor Infravermelho Transversal à Trajetória
DEP2	Depressão a 2 metros
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> – Centro Europeu de Previsão de Tempo de Médio Alcance
EOS	<i>Earth Observing System</i> – Sistema Observatório da Terra
FAR	<i>False Alarm Ratio</i> – Razão de Falso Alarme
GIG	Aeroporto Internacional do Galeão
GNS	<i>Global Navigation Satellite System</i> – Sistema de Navegação Global por Satélite
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i> – Satélite Operacional Ambiental Geoestacionário
HSB	<i>Humidity Sounder for Brazil</i> - Sonda de Umidade para o Brasil
IFS	<i>Integrated Forecasting System</i> – Sistema de Previsão de Tempo Integrado
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
K	Índice K
KGE	Kling-Gupta Efficiency
LAI	<i>Leaf Area Index</i> – Índice de Área Foliar
LI	Índice de Levantamento

LR	<i>Lapse-Rate</i> – Gradiente Adiabático
MISR	<i>Multi-angle Imaging Spectroradiometer</i> – Espectroradiômetro Imageador Multi-Ângulo
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> – Espectroradiômetro Imageador de Resolução Moderada
MOPITT	<i>Measurements of Pollution in the Troposphere</i> – Medição de Poluição na Troposfera
MRJ	Município do Rio de Janeiro
MSU	Unidade de Som de Micro-ondas
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> – Administração Aeronáutica e Espacial Nacional Norte Americana
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
POD	Probabilidade de Detecção
PW	<i>Precipitable Water</i> - Água Precipitável
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> - Raiz do Erro Quadrático Médio
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i> – Índice de Vegetação Ajustado pelo Solo
SCMs	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SF	Sistemas Frontais

SR	<i>Success Ratio</i> - Taxa de Sucesso
SSU	Unidade de Som Estratosférico
T	Temperatura do Ar
TC	Tempestades Convectivas
Td	Temperatura do Ponto de Orvalho
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i> – Missão de Medição de Precipitação Tropical
TS	Energia Total da Tempestade
TSC	Temperatura da Superfície Continental
TT	Total Totals
VAS	<i>GOES VISSR Atmospheric Sounder</i> – Sonda Atmosférica GOES VISSR
Wet-	<i>Wet Season Atmospheric Mesoscale Campaign</i> – Campanha
AMC/LBA	Atmosférica de Mesoescala em Estação Chuvosa
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCOU	Zonas de Convergência de Umidade
Z-N	Relação entre Refletividade e Nível de Água
Z-R	Relação entre Refletividade e Taxa de Precipitação

## Capítulo 1 - Introdução

### 1.1. Considerações iniciais

O desenvolvimento do campo técnico-científico de sensoriamento remoto, que permeia de forma direta ou indireta múltiplas camadas da sociedade humana, por vezes não percebido ou reconhecido, constitui-se em um dos temas mais abordados a partir de século XXI, tendo recebido notável impulso a partir de meados do século XX. Trata-se de tecnologia com crescente acessibilidade e acentuada diversidade de aplicações, embora complexa e desafiadora quanto ao entendimento de seus princípios e fundamentos, que têm apresentado resultados bastante satisfatórios e de notável importância para o desenvolvimento civilizatório atual.

No campo de pesquisa associado ao emprego de sensoriamento remoto, apresentam-se ainda diversas possibilidades a serem exploradas bem como ações em curso ou que carecem de atenção em termos de investimento e aprofundamento quanto ao seu entendimento com vistas a serem incentivadas, realizadas ou aperfeiçoadas, sobretudo quando o enfoque é o monitoramento dos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem em nosso planeta, responsáveis, em última instância, pela vida na Terra. Pode-se afirmar que, hoje, sem dúvida, o emprego do sensoriamento remoto por satélites tornou-se imprescindível na medida em que se pretende avançar em estudos e aplicações que envolvam abordar o monitoramento, a modelagem e a gestão de recursos hídricos e ambientais, com desdobramentos nas mais diversas áreas do conhecimento, do desenvolvimento socioeconômico e da vida social.

Sabe-se que sensores a bordo dos satélites orbitam o planeta Terra em altitudes que são superiores à espessura da camada atmosférica terrestre, buscando trabalhar com informações obtidas no topo da atmosfera, ao longo da atmosfera e sobretudo na superfície terrestre. Assim, os produtos espaço-temporais por eles fornecidos correspondem a valores estimados espaço-temporalmente, conforme parametrizações e especificidades peculiares de cada sistema sensor, que, naturalmente, demandam procedimentos de calibração e validação quanto à aquisição, tratamento de sinal e uso do dado registrado. No meio acadêmico-científico, existem diversos trabalhos que utilizam produtos de satélites conjuntamente com dados diversos, usualmente coletados em superfície, com o objetivo de investigar se o dado de sensoriamento remoto é uma opção viável para ser utilizado como fonte complementar a medições em superfície ou mesmo como uma fonte substituta de informações.

Em Meteorologia e em Hidrologia, ou mais recentemente nos campos de conhecimento que passaram a se denominar, muitas vezes, de Hidrometeorologia e de Hidroclimatologia, em função do grau de integração entre ciências distintas e das escalas espaço-temporais de análise conjunta, o uso de satélites tornou-se indispensável nas últimas décadas, seja meramente pela identificação visual de massas de ar e de água, seja por análises mais profundas de variáveis hidrometeorológicas que compõem o ciclo hidrológico. Com o advento e a evolução da tecnologia de satélites, observou-se que as aplicações nessa área estavam associadas aos processos de aquisição de dados no topo da atmosfera e na superfície terrestre, mediadas pela camada atmosférica em si.

Em termos sociais, naturalmente, as informações diretamente coletadas para a superfície terrestre continental e oceanográfica traduzem-se em impactos diretos para serem geridos pela sociedade, como ilustram os fenômenos de enchentes e de secas. Por outro lado, cabe destacar que a compreensão dos processos e fenômenos atmosféricos está intrinsecamente conectada com geração de processos hidrológicos de escoamento e de armazenamento de água de superfície ou subterrânea, desdobrando-se em termos de prover disponibilidade de água, quer em maior ou menor abundância, quer com maior ou menor frequência.

Tratar o perfil atmosférico local, para melhor compreender os padrões de ocorrência de conteúdo de umidade no ar, é, portanto, essencial na previsão e na prevenção de fenômenos naturais que podem potencialmente ocasionar, de um lado, benefícios, enquanto, por outro lado, danos patrimoniais e sociais. Nesse sentido, a análise do comportamento da atmosfera tem recebido crescente atenção nos últimos anos, embora ainda bastante limitado, com procedimentos de coleta cada vez mais acurados e com ampliado potencial de uso em estudos hidrometeorológicos.

O relatório mais recente de desastres ocorridos no Brasil mostra que eventos associados a fenômenos naturais, como inundações, secas e movimentos de massa, foram responsáveis por 10.460 óbitos, 103.589.876 afetados e cerca de US\$ 22.695.381.000,00 em prejuízo desde 1948 até março de 2020, segundo o Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres (EM-DAT, 2020).

Marengo (2010) aponta, em seu estudo, que as regiões sul e sudeste têm sido as mais afetadas nos últimos cinquenta anos devido ao aumento da intensidade e frequência de eventos extremos estreitamente relacionados às mudanças climáticas. Segundo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2018 e mais recentemente atualizado em 2022, alterações na intensidade e na frequência de alguns

extremos de clima e tempo foram detectadas ao longo do tempo, durante o qual ocorreu cerca de 0,5°C de aquecimento global. Ainda segundo o relatório, é provável que o aquecimento global atinja 1,5°C entre 2030 e 2052, caso continue a aumentar no ritmo atual.

Visto que as projeções apontam um aumento na frequência de eventos extremos, torna-se indispensável o aprofundamento da compreensão dos processos que levam à ocorrência de tais fenômenos e à geração de padrões atmosféricos como um todo. Evidencia-se que o assunto a explorar insere-se na conexão dos sistemas terrestre, atmosférico e oceanográfico. Entre esses três grandes sistemas, existem trocas de energia realizadas a todo instante. As transferências de calor e de momento regem o processo de formação de chuva e também a sua falta. No âmbito da análise dos processos entre a superfície continental e a atmosfera, bem como entre a atmosfera e o oceano, tecnologias como o sensoriamento remoto tornam-se poderosas ferramentas. Produtos variados de sensoriamento remoto têm sido concebidos e utilizados para estimar, entre outras variáveis hídrico-ambientais, a chuva, a temperatura da superfície, a umidade do solo, os fluxos energéticos, o relevo, os níveis de água de rios, reservatórios e oceanos, marés, coluna de água armazenada no solo, permitindo abordar mais adequadamente e extensivamente o balanço hídrico de bacias hidrográficas e de aquíferos, o monitoramento da propagação de núcleos de chuva, o exame da saúde de vegetações, de desmatamentos, de incêndios, entre outras aplicações de interesse da sociedade, nos níveis local, regional, continental e global.

Embora as colocações feitas em termos de produtos de sensoriamento remoto ensejem proporcionar uma visão ampliada do potencial de uso e amplitude de aplicabilidade dos dados de satélite, concentra-se atenção, na presente investigação, sobre a questão da identificação e análise do perfil atmosférico vertical local. Nesse sentido, direciona-se a presente pesquisa segundo o enfoque proposto na próxima seção do documento.

## **1.2. Formulação do problema**

O monitoramento e a previsão de tempo sobre a cidade do Rio de Janeiro conjuntamente com a identificação de padrões de variabilidade climatológica são extremamente necessários devido à climatologia da precipitação da região, que é marcada pela passagem de sistemas frontais e pela formação da Zona de Convergência do

Atlântico Sul (ZCAS), fenômenos frequentemente associados a desastres (Dereczynski *et al.*, 2009). Devido à alta concentração demográfica e ao terreno montanhoso, bem como à frequente ocorrência de eventos de chuva intensa, o estado mostra-se suscetível à ocorrência de deslizamentos, enchentes, alagamentos e outros distúrbios, que afetam a cidade e sua população (Silva e Júnior 2022).

Em geral, os pesquisadores apoiam-se na investigação de perfis atmosféricos locais, índices de instabilidade e campos de circulação atmosférica para identificar os principais mecanismos responsáveis pelos eventos extremos, de um lado, e, por outro lado, da caracterização climatológica. A maioria dos trabalhos dedica-se a estudos de casos isolados (Baima e Karam, 2014; Andrade *et al.*, 2015; Quadro *et al.*, 2016; Brasiliense *et al.*, 2017). Outros trabalhos baseiam-se na investigação de composição de casos, denominados de compostos (Lima *et al.*, 2010; Moura *et al.*, 2013; Seluchi *et al.*, 2016), que se baseiam na análise de integrações de diversos campos meteorológicos ao longo de diferentes intervalos de tempo. É evidente a importância da análise e compreensão da atmosfera local na previsão do tempo bem como subsídio para estudos climatológicas quando se examinam períodos mais longos de tempo. Logo, quanto mais completas e de fácil acesso as informações disponíveis para esse tipo de análise, maior a qualidade do diagnóstico e do prognóstico do comportamento atmosférico em diferentes escalas de tempo e de espaço.

Também em hidrologia como em meteorologia, mais especificamente na gestão de bacias hidrográficas e de bacias aéreas, respectivamente, dispor de ferramentas confiáveis para o estudo climatológico da região de interesse é de suma importância para o desenvolvimento do plano de atuação. Os setores de planejamento e de operação de entes públicos e privados bem como a própria formulação de planos diretores de municípios estão a requerer atenção redobrada. Esses últimos necessitam, caso existam, serem revisitados periodicamente, pois implicam alterações na lógica da ocupação do espaço geográfico e da convivência humana. No caso de bacias hidrográficas, a articulação da gestão hídrica e de saneamento, que pode ocorrer nos níveis municipal, de consórcio municipal, metropolitano, estadual e federal, conjuntamente com as regulações do uso do solo pelo Estatuto da Cidade, sob responsabilidade do município, necessitam atuar de forma conjunta e sinérgica.

À luz dessas informações, o monitoramento da chuva e a análise das interações estabelecidas entre a superfície e a atmosfera são fundamentais para estudos diversos, como, por exemplo, os estudos sobre eventos de chuva intensa e correspondentes

impactos, incluindo geração de inundações e deslizamentos de terra, e estudos que objetivem gerar produtos para monitoramento de indicadores de estresse hídrico ou de monitoramento de secas. Tais variáveis são úteis para estudos de clima urbano, principalmente devido à sua sensibilidade quanto à troca de calor sensível e latente que ocorre na interface terra-atmosfera, bem como, de forma geral, em áreas urbanas e rurais. Constata-se a influência na vida da sociedade com desdobramentos diversos, respeitando-se os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODSs) propostos segundo a Agenda da ONU para 2030. Como resultado, o conhecimento dos processos e padrões observados no sistema terra-atmosfera, sobretudo quanto ao perfil da atmosfera, é necessário em diferentes estudos hídricos e ambientais e atividades de gerenciamento de recursos naturais e de ações antrópicas.

Diante do exposto, observou-se o potencial de contribuição de informações oriundas de satélite de órbita polar para fins de perfilagem atmosférica local, com potencial de abrangência em distintas escalas espaço-temporais. Essa nova formulação permite explorar a complementaridade ao que se emprega no monitoramento hidrometeorológico atual, quer sob o ponto de vista de previsão do tempo ou de análise climatológica, que denota impactos variados quanto à geração e quanto à disponibilidade de água em superfície, uma vez que, muitas vezes, o monitoramento tem se cingido predominantemente, em termos de satélites, a dados de natureza geostacionária, o que é perfeitamente compreensivo, mas que não esgota as possibilidades que agora se apontam no presente trabalho em termos de emprego de dados oriundos de satélite de órbita polar.

### **1.3. Antecedentes históricos de pesquisa**

Tratando-se de informações obtidas por sensores a bordo de satélites, inúmeros trabalhos dedicaram-se a validar esses dados tendo outras fontes como referência. Muitos utilizaram de comparações entre satélite e dados *in situ*, enquanto outros procuraram validar as informações com outros produtos de satélite já anteriormente testados e produtos de modelos numéricos de referência.

Como delineado na seção de formulação do problema, o presente trabalho optou por concentrar esforços no estudo de dados de satélites de órbita polar em contraposição a dados de satélites geostacionários, frequentemente usados em estudos meteorológicos de monitoramento de eventos chuvosos e de caracterização climatológica. Na sequência, apenas uma pequena amostra de trabalhos é referenciada para ilustrar análises múltiplas

que envolvem os processos entre a terra e a atmosfera, notadamente integrando dados observacionais terrestres e dados de satélite.

Oliveira (2014), por exemplo, reuniu informações sobre padrões atmosféricos e limiares de chuva associados a deslizamentos no município de Nova Friburgo (Região Serrana do Rio de Janeiro) de novembro de 2008 a dezembro de 2011. Além da identificação dos sistemas atuantes, foram comparados dados pluviométricos coletados *in situ* com estimativas de precipitação pelo produto TRMM (*Tropical Rainfall Measurement Mission*) com o objetivo de definir limiares associados aos movimentos gravitacionais de deslizamentos de terra. De acordo com o estudo, foi possível identificar que aproximadamente 70% dos eventos estiveram associados à ocorrência de Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e cerca de 13% à ocorrência de Zonas de Convergência de Umidade (ZCOU). Os resultados obtidos com a precipitação do TRMM mostraram que o uso desse tipo de dado é mais indicado para acumulados de 24 horas do que para acumulados em 3 horas. Complementarmente, o estudo conduzido em Guerreiro (2013), para a mesma região, investigou a ocorrência de deslizamentos, no entanto com enfoque no mapeamento e no reconhecimento de cicatrizes usando imagens do satélite *Geosyde* de altíssima resolução espacial.

Na linha de estudos de eventos de chuva intensa, destaca-se o trabalho recente de Souza *et al.* (2020), por exemplo, quando os autores utilizaram o produto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS), em contraste com dados de estações pluviométricas e produtos de satélite TRMM, para analisar a frequência de eventos de chuva intensa na bacia do rio Madeira na Amazônia de 1981 a 2017. O CHIRPS é um produto de precipitação quase global com mais de 35 anos abrangendo 50°S - 50°N (e todas as longitudes) e variando de 1981 até o presente. O produto incorpora imagens de satélite com resolução de 0,05° e dados de estação *in situ* para criar séries temporais de chuva em grade para análise de tendências e com potencial também de monitoramento de secas sazonais.

Por fim, neste resgate de alguns trabalhos que motivam a realização desta dissertação, cabe destacar o trabalho de Silva (2019), que examinou a produção de chuvas severas na região metropolitana do Rio de Janeiro e na bacia do Piabanha, incluindo a questão da investigação de inundações em uma sub-bacia do Piabanha, bacia do Quitandinha. Em especial, pode-se pontuar que o destaque maior foi no uso de radiossondas para observação da atmosfera e ampliação do potencial de previsão de curto prazo para estimular ações antecipadas no enfrentamento de eventos muitas vezes catastróficos. A

emissão de alertas e o ensaio de aperfeiçoamento de rotinas operacionais de previsão foram colocados em perspectiva e como foco na pesquisa que envolveu o uso e análise de radiossondagens conjuntamente com outras informações de modelagem atmosférica e oriundas de observação satelital bem como dados de radar meteorológico.

Diante do quadro traçado, pode-se, agora, enunciar o objetivo geral do trabalho e delimitar os objetivos específicos para poder atender ao escopo proposto para esta dissertação.

#### **1.4. Objetivos – geral e específicos**

A presente dissertação tem como objetivo geral analisar a aplicabilidade de produtos de perfil atmosférico obtidos por sensores de satélites, mais especificamente produtos do sensor MODIS do satélite TERRA, adotando-se dados de radiossondagem e de reanálise para a correspondente validação. A área de estudo selecionada foi a cidade do Rio de Janeiro. Tendo em vista o objetivo apresentado, estabeleceram-se algumas metas descritas, a seguir, de forma sucinta, a saber:

1. avaliar as variáveis temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho estimadas pelo MODIS tendo como base informações de radiossondagens do Aeroporto Internacional do Galeão e do campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro na Ilha do Fundão;
2. analisar os valores de água precipitável calculadas com as informações do MODIS em comparação com as informações de radiossondagem e de reanálise ECMWF – ERA 5 (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*);
3. detectar possíveis contribuições e limitações do produto MOD07 no monitoramento meteorológico, buscando-se delinear se o produto é passível de utilização sobre a cidade do Rio de Janeiro.

#### **1.5. Contribuição da pesquisa**

Na execução deste trabalho, foram avaliados dados já mensurados, quer seja por meio de experimentos de lançamento de radiossondas, quer seja adquirido por acesso a dados de satélites coletados e dispostos em repositórios com acesso público. Espera-se que as informações obtidas com o presente estudo possam alertar sobre as novas possibilidades quanto ao uso de produtos de satélites de órbita polar no tocante à avaliação de perfis atmosféricos, permitindo inseri-los como uma nova alternativa para complementar

análises de condições meteorológicas. Deve-se ressaltar que a metodologia aplicada, neste trabalho, apresenta potencial para ser utilizada em outras regiões do mundo onde se queira compreender as características da atmosfera.

Tendo como objetivo analisar a aplicabilidade do produto de perfil atmosférico do sensor MODIS sobre a cidade do Rio de Janeiro, o presente trabalho propõe-se a promover as seguintes contribuições:

- validação de informações hidrometeorológicas obtidas por satélite segundo uma comparação com dados coletados em campo e com dados de reanálise;
- definição da viabilidade da utilização do produto de perfil vertical atmosférico do MODIS sobre regiões da cidade do Rio de Janeiro;
- determinar qualidades e limitações quanto ao uso do produto sobre a região de estudo.

Adicionalmente, face aos resultados encorajadores evidenciados nesta pesquisa quanto ao uso de dados de satélite de órbita polar para estimar perfis atmosféricos, pressupõe-se ainda que se possa explorar o seu valor agregado para análise dos padrões atmosféricos, que podem ser associados a eventos de chuva, seca ou chuva intensa, destacando-se ainda a possibilidade de utilização em análises de variações e busca de padrões ao longo do tempo, aportando a perspectiva de elaboração de estudos climatológicos locais, regionais e globais.

## **1.6. Estrutura do trabalho**

A dissertação está organizada em seis capítulos ao total, sendo o Capítulo 1 dedicado à parte de motivação, contexto e formulação do problema. No capítulo introdutório, são definidos o objetivo geral e os objetivos específicos, que, resumidamente, tratam da validação de dados de sensoriamento remoto de órbita polar correlatos a perfis de sondagem atmosférica e análise da aplicabilidade de tais dados na rotina diária de monitoramento e previsão de tempo sem deixar de pontuar o potencial de uso em estudos climatológicos. Aponta-se, como região de estudo, o município do estado do Rio de Janeiro, mais especificamente as áreas do Aeroporto Internacional do Galeão e do campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro situado na Ilha do Fundão. As análises assumem o ponto de vista predominantemente meteorológico, uma vez que se relacionam com a presença de mecanismos de formação das nuvens, temperaturas do ar e do ponto

de orvalho, conteúdo de água na atmosfera, ensejando a chuva ou a sua ausência. No Capítulo 1, são ainda mencionados alguns trabalhos acadêmicos, que, assim como o presente trabalho, enfatizaram a compreensão dos processos que ocorrem entre a superfície e a atmosfera mediante o uso do sensoriamento remoto, sobretudo com enfoque em satélites de órbita polar.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os diferentes recursos disponíveis para análise de perfil vertical atmosférico e suas especificidades. Sob a perspectiva de radiossondagens, são apresentados alguns dos índices termodinâmicos utilizados no diagnóstico da estabilidade e da instabilidade da atmosfera. Adicionalmente, são revisados diversos trabalhos que utilizaram os dados de radiossondagens como fonte principal de informações, muitos deles tratando de casos de chuva extrema. Complementarmente, no Capítulo 2, são levantadas algumas das limitações do uso de produtos de satélites em hidrometeorologia. Assim, descreve-se, em maiores detalhes, o produto do sensor MODIS, de órbita polar, examinado na presente dissertação, bem como relatam-se trabalhos que utilizaram o mesmo sensor em estudos similares ao aqui proposto. Alguns outros sensores e produtos de outros satélites para estudo da atmosfera vertical também são apresentados no capítulo.

No Capítulo 3, em linhas gerais, descreve-se a metodologia adotada para a execução do presente estudo. São apresentados todos os dados utilizados assim como as ferramentas, os métodos de assimilação e o procedimento de avaliação da aplicabilidade desses dados no contexto de perfilagem atmosférica.

No Capítulo 4, são dispostos os resultados obtidos na avaliação do produto de perfil atmosférico do sensor MODIS. O capítulo está dividido, conforme as análises feitas, segundo a seguinte sequência: (i) primeiramente, procurou-se comparar os 10 anos de dados (2011-2020) selecionados com relação à temperatura do ar e à temperatura do ponto de orvalho sobre a região do Aeroporto Internacional do Galeão; (ii) em seguida, compararam-se os resultados dos cálculos de água precipitável com MODIS, contrastando-os com radiossondagens e reanálises na área que abrange o Aeroporto Internacional do Galeão; (iii) ao final do capítulo, o produto MODIS foi aplicado a dias específicos selecionados e comparado com radiossondagens sobre a Ilha do Fundão.

A aplicabilidade do produto é investigada de forma mais aprofundada mediante o desenvolvimento de dois estudos de caso de eventos de chuva intensa apresentados no Capítulo 5. Cabe observar que o presente trabalho não tem a pretensão, neste momento, de usar o tipo de informação do produto MODIS de forma intensiva em meteorologia

operacional nos termos de previsão de curtíssimo prazo (*nowcasting*), mas trazer à luz que satélites de órbita polar podem ter uma contribuição a oferecer no monitoramento de eventos chuvosos ou ainda, especialmente, na caracterização de padrões climatológicos locais, regionais e globais. Desse modo, tendo em mente os resultados expostos no Capítulo 4, objetiva-se complementarmente explorar a aplicação da metodologia proposta no Capítulo 3 na região geográfica de análise da presente pesquisa, ou seja, na cidade do Rio de Janeiro. Em especial, faz-se o recorte da análise para avaliação de dois eventos de chuva intensa que ocorreram no período entre 24 e 26 de abril de 2011 e entre 14 e 15 de fevereiro de 2018. Os eventos exemplificam dois casos cuja ocorrência trouxe diversos transtornos aos moradores conjuntamente com prejuízos econômicos causados à cidade.

No Capítulo 6, é feita uma discussão final sobre todos os resultados com base no objetivo geral proposto, desdobrado em metas, elaborando-se, então, as conclusões e as recomendações do trabalho, completando-se o texto da dissertação. Ao final, são ainda elencadas as referências bibliográficas e dispostos os anexos.

## **Capítulo 2 - Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica**

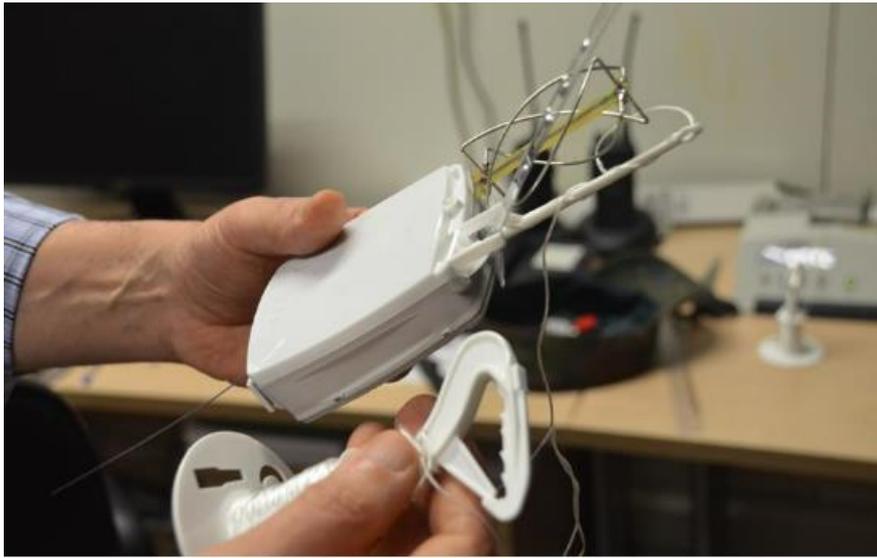
Neste capítulo, apresentam-se os fundamentos e a revisão bibliográfica que deu suporte ao desenvolvimento da pesquisa sobre explorar o uso do sensoriamento remoto aplicado à identificação de perfis atmosféricos. Em especial, abordam-se as especificidades quanto ao uso de radiossondas, de reanálises e produtos de satélites de órbita polar. Na sequência do texto, tem-se, de uma parte, a discussão sobre o entendimento da atmosfera local a partir de radiossondas e de reanálises, incluindo a revisão de diferentes indicadores para descrever o estado da atmosfera. De outra parte, apresenta-se uma descrição do produto de satélite MODIS associado com o detalhamento do perfil atmosférico conjuntamente com outros produtos e trabalhos que guardam relação com o escopo da pesquisa. Espera-se que, a partir da avaliação da literatura publicada, o leitor possa melhor compreender o estado da arte atual na área temática escolhida bem como as lacunas existentes no conhecimento, permitindo identificar a racionalidade da construção da proposta metodológica desta dissertação, detalhada em suas diversas etapas no próximo capítulo.

### **2.1. Radiossondagem e estudo da atmosfera**

A radiossondagem tem papel fundamental na análise da atmosfera. Com as informações dessa fonte, é possível compreender o estado presente e as possíveis condições alternativas e futuras da estrutura atmosférica. Informações do perfil vertical da temperatura do ar, da temperatura do ponto de orvalho, da velocidade e da direção do vento são usadas diariamente por meteorologistas, engenheiros, profissionais da aviação, empresas públicas e privadas, entre outros atores sociais. Com esse equipamento, é possível coletar informações de temperatura, umidade, velocidade do vento e pressão em diversos níveis da atmosfera.

A radiossonda tem sensores acoplados a uma caixa conectada ao balão meteorológico (Figura 2.1), que, após uma série de procedimentos de testagem e avaliação, incluindo enchimento do balão a partir de cilindros de gás hélio, é liberada na atmosfera podendo chegar até 25 km de altitude (Figura 2.2). Com a sua ascensão, são coletadas as variáveis e transmitidos os valores via rádio para o equipamento de solo. Um dos modelos de radiossonda utilizada no Brasil é o RS92-SGP, fabricada pela empresa Vaisala. Esse tipo de radiossonda foi empregada em experimentos de campo realizados no âmbito do

Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Programa de Engenharia Civil do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a partir de equipamento Vaisala adquirido junto à empresa HOBECO, com suporte da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), conforme relatado em Silva (2019), que geraram parte dos dados estudados nesta dissertação. Atualmente, a Vaisala utiliza a radiossonda RS-41, que faz parte de uma de sequência histórica de aperfeiçoamentos na produção de radiossondas.



**Figura 2.1** – Sensores responsáveis pela leitura dos dados em altitude. Lançamento de radiossondagem. Fonte: <http://www.vaisala.com>.



**Figura 2.2** – Lançamento ilustrativo de radiossondagem em 13/02/2017 no Instituto de Geociências – UFRJ Campus Ilha do Fundão.

Na literatura, a maioria dos trabalhos que utiliza o recurso da radiossondagem visa compreender, de forma profunda, a origem de eventos de chuva, buscando identificar as causas e as forças atmosféricas atuantes. Tais trabalhos exploram com riqueza os recursos de análise disponíveis por radiossondagens, evidenciando a grande importância dessa fonte de informações. O assunto mais frequentemente tratado é a questão da instabilidade da atmosfera local. Sob o ponto de vista do referencial exposto, ilustram-se, a seguir, alguns trabalhos realizados no Brasil e no mundo que utilizaram as radiossondagens como fonte de dado principal em uma análise das condições atmosféricas locais. Também são apresentados, com detalhes, alguns dos recursos de mensuração e de métricas passíveis de serem geradas a partir dos dados de radiossondagens.

Alguns deles são: Índice K (K), Total Totals (TT), Índice de Levantamento (LI, em inglês) e Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE, em inglês), Energia Total da Tempestade (TS), Índice de Inibição Convectiva (CIN, em inglês), Gradiente Adiabático (*Lapse-rate*). A Tabela 2.1 apresenta os índices mencionados juntamente com as suas respectivas fórmulas.

**Tabela 2.1 - Índices de instabilidade atmosférica.**

Índice	Fórmula
K	$K = (T_{850} + Td_{850} + Td_{700}) - (T_{700} + T_{500})$
TT	$TT = (T_{850} + Td_{850}) - 2 \times T_{500}$
LI	$LI = T_{500} - T_{p500}$
CAPE	$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \left( \frac{\theta_{vp}(z) - \theta_v(z)}{\theta_v(z)} \right) dz$
TS	$TS = C_p T_{500} + gZ_{500} + Lq_{500} + \frac{v^2_{500}}{2}$
CIN	$CIN = g \int_{SFC}^{LFC} \left( \frac{\theta_{vp}(z) - \theta_v(z)}{\theta_v(z)} \right) dz$
<i>Lapse-rate</i>	$LR = - \frac{\partial T_{700/500}}{\partial Z_{700/500}}$

Em especial, observa-se que o presente trabalho concentrou atenção nos índices K, Total Totals e LI, que representam as métricas disponibilizadas no produto MODIS que foi selecionado para ser avaliado na pesquisa. Na sequência, para completude da exposição, são apresentados princípios físicos que fundamentam a formulação dos indicadores listados na Tabela 2.1.

O índice K é calculado pela subtração de T em 700 hPa e T em 500 hPa da soma de T e Td no nível de 850 hPa e de Td em 700 hPa (George, 1960). Esse índice representa a variação vertical de temperatura no conteúdo de umidade na baixa troposfera e na extensão vertical da camada úmida. Segundo Miller (1972), o Total Totals é calculado similarmente ao índice K, porém não leva em consideração Td em 700 hPa e leva em consideração o nível de 500 hPa, o que melhora a detecção de instabilidades associadas a massas mais frias e secas. O LI representa a diferença entre a temperatura do ambiente em 500 hPa e a temperatura da parcela levantada por um adiabática saturada desde o nível de convecção livre (em inglês, *level of free convection* - LFC) até o nível de 500 hPa (Galway, 1956).

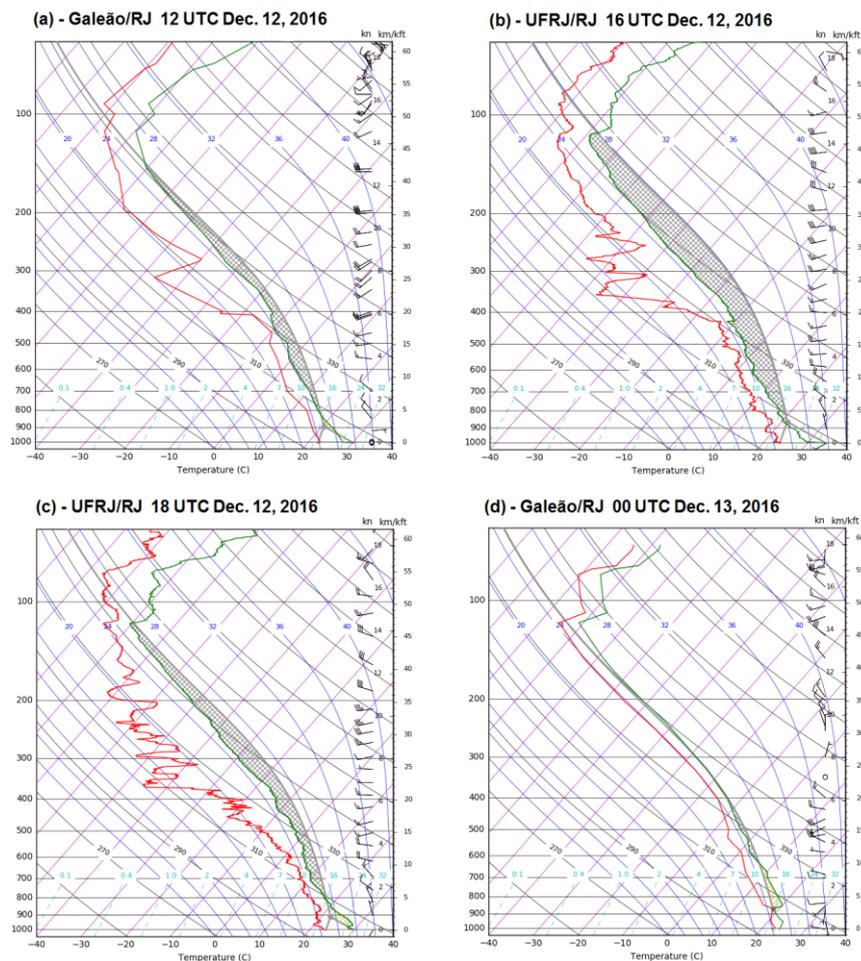
Complementarmente, a CAPE representa a energia cinética que a parcela de ar tem disponível e o quanto ela pode ascender na atmosfera de forma livre. O cálculo é feito por uma integração da diferença entre o perfil de temperatura potencial virtual da parcela ( $\theta_{vp}$ ) e o perfil de temperatura potencial virtual do ambiente ( $\theta_v$ ) (Houze, 1993). Os limites inferior e superior de integração são o nível de convecção livre e o nível de estabilidade (em inglês, *stability level* - EL) respectivamente. A CAPE ganha atenção especial no momento da avaliação, pois representa o potencial energético convectivo que pode ser entregue a uma tempestade (Bluestein, 1993; Derubertis, 2006).

A energia total da tempestade (TS) é dada pela soma da entalpia específica, energia potencial, energia produzida pela liberação de calor latente e energia potencial. Segundo Darkow (1986), esse índice é um dos mais adequados para análise de fenômenos convectivos. O índice inibição convectiva (CIN) funciona como o oposto da variável CAPE citada anteriormente. Esse índice representa a quantidade de energia ou trabalho necessária para levantar uma parcela de ar mecanicamente desde a superfície (SFC) até o LFC, onde a parcela começa a ascender livremente devido à flutuabilidade. O *lapse-rate* (LR) ou taxa de variação vertical da temperatura representa a variação de temperatura entre os níveis isobáricos de 700 hPa e 500 hPa. Segundo Nascimento (2005), quanto maior o LR (geralmente acima de 6°C/km) entre essas duas camadas, maior a instabilidade atmosférica para atividade de convecção.

Trabalhos como Hallak e Filho (2012), Foss (2011), Henry (1999), Brooks e Anderson (2004) e Nascimento (2005) visaram determinar os valores limítrofes que indicariam se o ambiente atmosférico local é favorável à ocorrência de chuva intensa ou não.

Em seu trabalho, Nascimento (2005) traçou uma estratégia operacional para a previsão de tempestades severas no Brasil. A maioria dos estudos sobre os índices de instabilidade foram feitos com base na climatologia das latitudes médias da América do Norte. Nascimento (2005) destaca que tais índices podem ser utilizados na América do Sul, principalmente para a detecção de sistemas convectivos de mesoescala (SCMs) na região sul do Brasil. O autor sugere uma integralização entre dados como índices termodinâmicos obtidos com dados de radiossondagens, dados observacionais e saídas de modelos de mesoescala. Nesse mesmo trabalho, são apontados valores limítrofes referentes aos índices termodinâmicos que podem indicar um ambiente favorável à ocorrência de tempestades severas. Os valores dos índices são avaliados conforme o grau de instabilidade traduzido da atmosfera.

O trabalho de Silva *et al.* (2017) representa um dos recentes estudos quanto ao uso dos índices termodinâmicos obtidos por radiossondagem na detecção da possível formação de tempestades e chuvas intensas. O experimento consistiu no lançamento de radiossondas em horários alternativos que complementavam as sondagens feitas no Aeroporto Internacional do Galeão (GIG). Os horários escolhidos foram 1200 UTC, 1600 UTC, 1800 UTC e 0000 UTC dos dias 29/11/2016 e 12/02/2016, e as radiossondas foram lançadas do Instituto de Geociências da UFRJ Campus Ilha do Fundão (Figura 2.3). Segundo os autores, nos dias citados, estava prevista chuva intensa no município do Rio de Janeiro. Efetivamente, apenas ocorreu chuva intensa no dia 12/12/2016. No dia 29/11/2016, foi possível observar, pelo diagrama SkewT/LogP traçado com dados das sondagens, um ganho de energia cinética na tarde desse dia, quando a CAPE passa de  $227,7 \text{ J.kg}^{-1}$  às 1200 UTC para  $1314,3 \text{ J.kg}^{-1}$  às 16 UTC. Já no dia 12/12/2016, as condições iniciam similarmente ao dia 29/11, porém, no início da tarde, a energia cinética na atmosfera aumenta chegando a uma CAPE de  $3726,1 \text{ J.kg}^{-1}$  às 1600 UTC. Os índices LI, K e TT foram similares em ambos os dias, mostrando instabilidade. A grande diferença foi observada na evolução da CAPE quando essa diminuiu no decorrer da tarde do 29/11/2016 e aumentou na tarde do 12/12/2016.



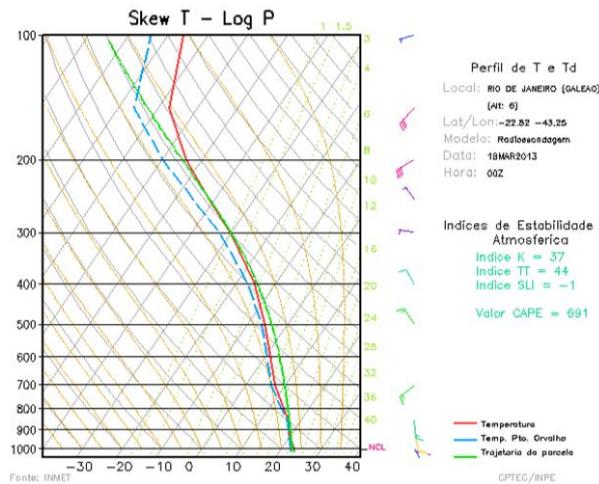
**Figura 2.3** – Diagramas Skew-T para SGBL nos seguintes horários: (a) 12000 UTC 12/12/2016; (b) 16000 UTC 12/12/2016; (c) 1800 UTC 12/12/2016; (d) 0000 UTC 13/12/2016. Fonte: Polifke *et al.* (2017).

Complementarmente, Silva (2019) propôs uma nova estratégia para a previsão de chuvas com ênfase no transbordamento do rio Quitandinha em Petrópolis, município do Rio de Janeiro. Os eventos analisados ocorreram entre os anos de 2013 e 2016. A metodologia aplicada foi dividida em três etapas avaliativas. Primeiramente, as análises foram feitas na escala sinótica, passando para escala local e finalizando na escala de previsão de curtíssimo prazo ou de natureza instantânea (*nowcasting*). Na primeira etapa, foi executada uma análise morfométrica e hidrológica da bacia do rio Quitandinha, incluindo a caracterização dos sistemas meteorológicos atuantes na região. Na segunda etapa, foram lançadas radiossondas sobre a região com o objetivo de identificar os padrões sinóticos associados a tempestades. Nesse contexto, foram avaliados diversos índices termodinâmicos e dinâmicos utilizando a metodologia da tabela de contingência e diagrama ROC (Wilks, 1995) com o objetivo de identificar aqueles índices que melhor

representavam as condições atmosféricas. Adicionalmente, foi empregado o modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF) (Skamarock *et al.*, 2008) visando investigar os gatilhos dinâmicos nos eventos de chuva. Na terceira e última etapa, utilizando um radar meteorológico, foram ajustadas relações Z-R (relação entre refletividade e taxa de precipitação) e proposta uma relação Z-N entre refletividade e nível de água.

Nesta revisão, cabe destacar o trabalho de Siqueira e Marques (2016), que estudaram as características de sistemas convectivos de mesoescala (SCMs) embebidos em um sistema frontal (SF), o que levou à geração de tempestades sobre o estado do Rio de Janeiro nos dias 02/01/2013 e 03/01/2013. Termodinamicamente, os diagramas Skew-T de SBGL de 1200 UTC do dia 02/01 e 0000 UTC do dia 03/01 apresentavam muita umidade na baixa troposfera e forte redução de umidade acima de 700 hPa. Logo, o ambiente atmosférico era extremamente favorável ao desencadeamento da convecção profunda. Os autores observaram também que houve forte cisalhamento do vento nos baixos níveis da atmosfera durante a tempestade. Os índices de instabilidade no horário de 0000 UTC do dia 03/01 eram também favoráveis à formação de tempestades: CAPE=1159,0 J.kg<sup>-1</sup>, TT=48,0°C e K=39,5°C. Porém o índice de levantamento (LI) era acima do esperado para formação de tempestades (LI= -3,8°C).

Andrade *et al.* (2015) analisaram o caso de chuva extrema de 18/03/2013 que atingiu as cidades de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo. No trabalho, os autores avaliaram o perfil vertical da atmosfera com um diagrama Skew-T da estação SBGL às 0000 UTC 18/03 (Figura 2.4). Os resultados indicaram que atuava, sobre a região, uma frente fria seguida por um anticiclone intenso que se posicionava ao sul do Uruguai e estabelecia um escoamento de sul perpendicular à costa do Rio de Janeiro. A atmosfera encontrava-se totalmente saturada, e foram observados ventos intensos de sul nas primeiras camadas. Os índices de instabilidade, exceto LI e CAPE, eram favoráveis à formação de tempestades severas, com TT=44,0°C e K=37,0°C.



**Figura 2.4** – Diagrama Skew-T para SBGL às 0000 UTC do dia 18/03 de 2013. Fonte: Andrade *et al.* (2015).

Além da região sudeste do Brasil, outras regiões destacam-se pelas chuvas intensas. Sobre elas, também são feitos estudos da estrutura vertical da atmosfera relacionada a tempestades. Mota *et al.* (2006) analisou a estrutura atmosférica associada a eventos de chuva durante a campanha *Wet Season Atmospheric Mesoscale Campaign* (Wet-AMC/LBA) de 10/01/1999 a 28/02/1999 no estado de Rondônia. O estudo teve como objetivo buscar uma relação entre a precipitação e os valores de CAPE e o anticiclone da Bolívia (AB). Os autores observaram dias com altos valores de CAPE que não apresentaram precipitação. Outros dias com valores tímidos de CAPE apresentaram chuva. Concluíram que a precipitação local não estava associada somente a fatores termodinâmicos, mas que também era fortemente regida por fatores dinâmicos como a zona de convergência intertropical (ZCIT) e eventos como linhas de instabilidades (LIs). No que diz respeito à AB, registraram que valores altos de CAPE aumentavam a vorticidade anticiclônica da AB e assim favoreciam a instabilidade. Observaram, também, que valores menores de CAPE enfraqueciam a AB, causando uma estabilidade atmosférica local.

Ainda em Belém, Gille e Mota (2014) usaram o método dos decis para classificar eventos de chuva extrema e associá-los a valores de CAPE e energia de inibição da convecção (CIN) no período de agosto de 2008 a dezembro de 2009. Similarmente a Mota *et al.* (2016), os autores observaram que chuvas extremas ocorriam com frequência independentemente dos valores de CAPE. Concluiu-se que os fatores dinâmicos foram de extrema importância na ocorrência de eventos de chuva intensa. Em casos que dependeram exclusivamente da CAPE, valores muito altos de energia foram observados.

Além de análises pontuais, o emprego de radiossondagens também pode estar presente em trabalhos que visam uma análise climatológica como Camponogara *et al.* (2012). Os autores buscaram padrões termodinâmicos que estivessem associados a chuvas extremas em Belém no Pará. Para essa investigação, utilizaram-se do método de funções ortogonais empíricas (em inglês, *empirical orthogonal functions* – EO) para analisar radiossondagens e dados de precipitação. Adicionalmente, analisaram como o modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) simulava característica de chuva acumulada diária. Observaram os maiores valores de CAPE e chuvas extremas no período outubro/novembro/dezembro.

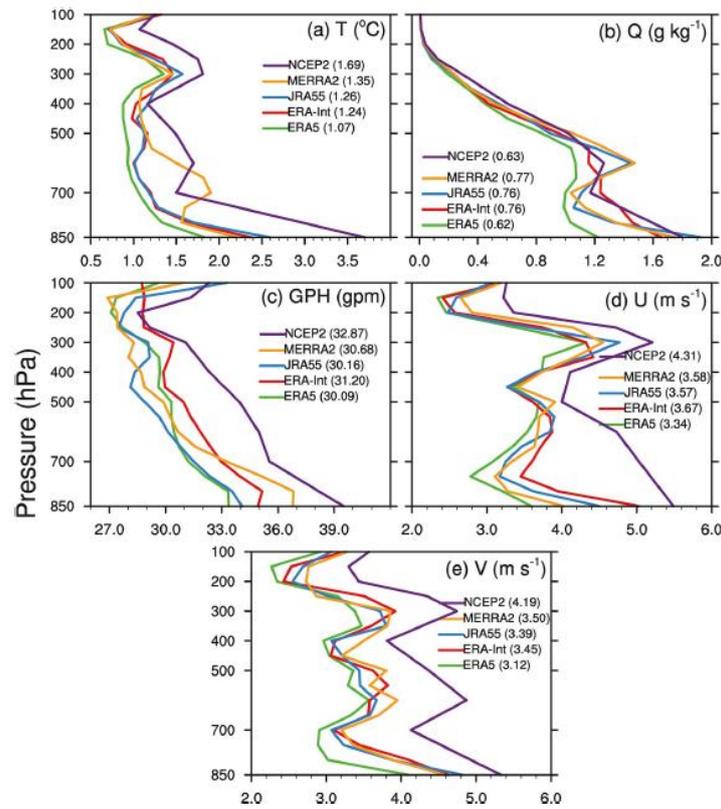
## 2.2. Reanálise ECMWF - ERA 5

Tratando-se da atmosfera tropical, Virman *et al.* (2021) promoveram uma comparação entre as reanálises ECMWF - ERA5 e ERA-Interim com informações de radiossondagens sobre a região oeste do Oceano Pacífico e leste do Oceano Índico, observando-se que o período analisado foi o verão de cada ano desde 1998 a 2014. Contrastando os valores obtidos das diferentes fontes para temperatura do ar (T) e umidade relativa do ar (UR) na estrutura vertical, os resultados mostraram que, em muitos níveis, temperatura e umidade em ERA5 e em ERA-Interim diferem das medidas adquiridas mediante o emprego de radiossondagens. Adicionalmente, registra-se que a reanálise ERA-Interim produz, geralmente, informações mais próximas do que ERA 5 na baixa a média troposfera em contraste com as radiossondagens. Os autores acreditam que a diferença seja devida à formulação modificada de movimentos profundos da reanálise ERA 5 e o seu correspondente mecanismo de sensibilidade à umidade relativa do ar. Ainda segundo os autores, é necessária uma avaliação mais extensa do modelo para entender as razões das diferenças entre as reanálises e as observações de radiossonda.

Em regiões extra-tropicais, Huang *et al.* (2021) avaliaram o uso de cinco diferentes produtos de reanálise promovendo uma comparação com informações de radiossondagens durante o verão no deserto central de Taclamacã, localizado na China. As reanálises avaliadas foram ECMWF - ERA5, *ECMWF Reanalysis-Interim* (ERA-Interim), *Japanese 55-years Reanalysis* (JRA55) (Harada *et al.*, 2016), *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications version 2* (MERRA2) (Gelaro *et al.*, 2017) e a *National Centers for Environmental Prediction - Department of Energy Reanalysis version 2* (NCEP2) (Kanamitsu *et al.*, 2002). Nesse estudo, foram analisadas

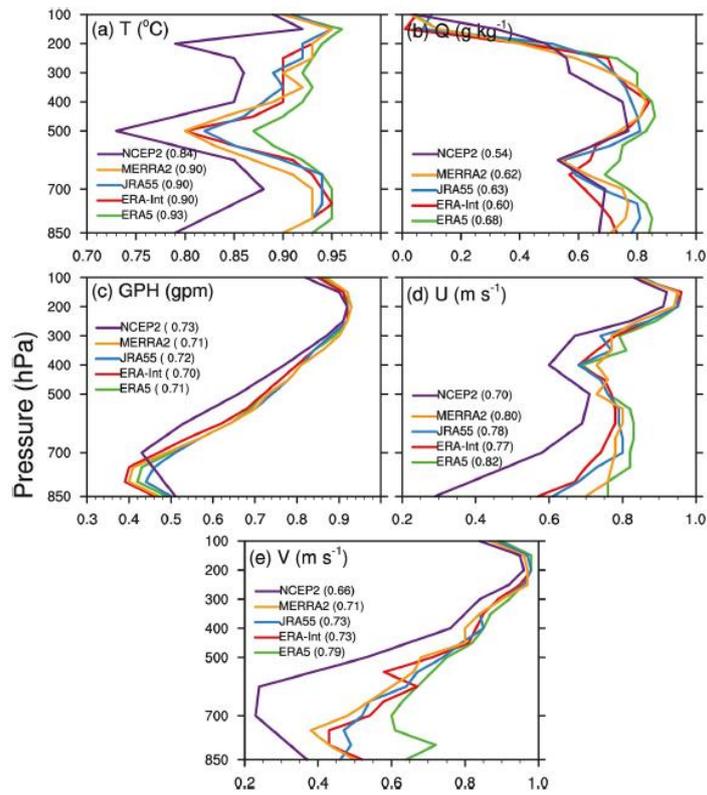
as variáveis meteorológicas temperatura do ar (T), umidade específica do ar (Q), altura geopotencial (GPH), vento zonal (U) e vento meridional (V) nos níveis de 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150 e 100 hPa. A Figura 2.5 apresenta os resultados da comparação entre reanálises e radiossondagens com (a) raiz do erro quadrático médio (em inglês, *root mean square error* - RMSE), (b) correlação e (c) erro médio.

(a)



**Figura 2.5** – Comparações entre reanálises e radiossondagens sobre o deserto central de Taclamacã – China com as variáveis T, Q, GPH, U e V usando as seguintes métricas estatísticas: (a) RMSE; (b) correlação; (c) erro médio. Fonte: Huang *et al.* (2021).

(b)



(c)

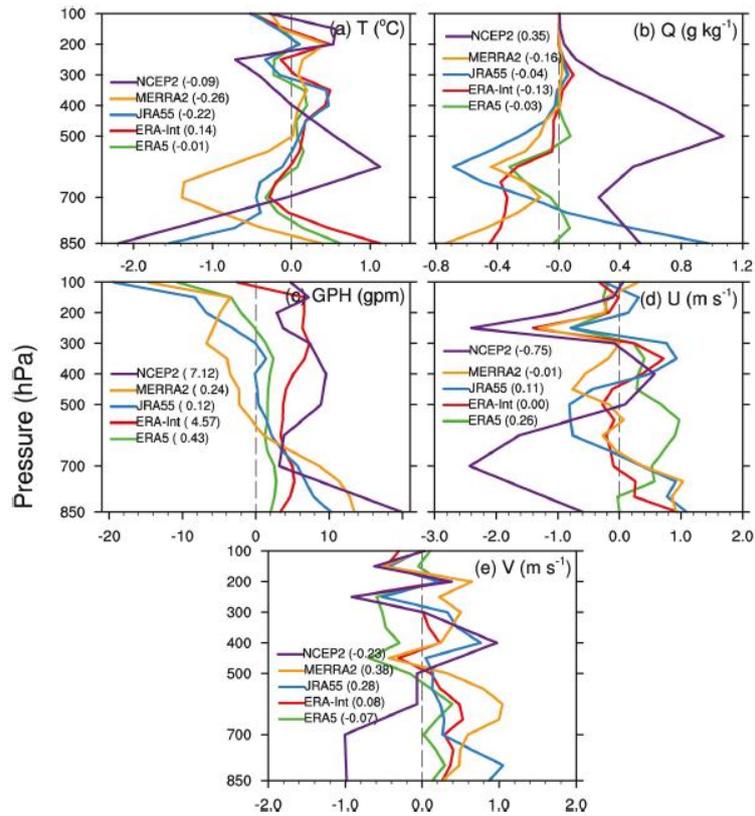


Figura 2.5 – Continuação.

Os resultados mostraram que a temperatura do ar de reanálise (T), umidade específica do ar (Q), altura geopotencial (em inglês, geopotential height - GPH) e campo de velocidades do vento (componentes U e V) são consistentes com as observações de radiossonda em termos da distribuição vertical. Em geral, ERA5 teve o melhor desempenho no deserto central de Taclamacã durante o período de estudo, seguido por ERA-Interim. Segundo os autores, a reanálise NCEP2 produziu o maior erro, enquanto os erros de todos os dados das reanálises mostraram variações diurnas significativas. Além disso, os resultados indicaram que o conjunto de dados de reanálise tem o maior desvio em 850 hPa, o que significa que, na região desértica, podem existir interações complexas entre a superfície terrestre e a atmosfera.

Outra variável atmosférica amplamente explorada por informações de reanálises é o conteúdo de vapor de água precipitável (PWV). Jiang *et al.* (2019) analisou a variável sobre a Ásia Central de 2006 a 2012 com base em oito produtos de reanálise, incluindo ECMWF – ERA 5, *ECMWF interim reanalysis* (ERA-Interim) (Dee *et al.*, 2011), *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmosphere Research Reanalysis* (NCEP1) (Kalnay *et al.*, 1996), NCEP2, *NCEP Climate Forecast System Reanalysis* (CFRSR) (Saha *et al.*, 2010), JRA55, entre outros. Também foram utilizados dados de radiossondagens e dos sensores AIRS, *Advanced Microwave Sounding Unit* (AMSU) e *Humidity Sounder for Brazil* (HSB) a bordo do satélite AQUA. Os resultados indicaram que todos os oito conjuntos de dados de reanálise puderam reproduzir razoavelmente as variações espaço-temporais de PWV, porém superestimando na primavera, outono e inverno e subestimando no verão. ERA5 e MERRA2 tiveram o melhor desempenho, enquanto NCEP1 e NCEP2 tiveram desempenho avaliado como insuficiente.

A reanálise também é comumente utilizada em análise de casos específicos. Reis e Gonçalves (2019), por exemplo, utilizaram as informações ERA 5 na análise da tempestade tropical Iba que ocorreu na costa leste do Brasil de 22 a 28 de março de 2019. No trabalho, também foram analisadas imagens do satélite Goes-16 e radiossondagem lançada no dia 25 de março. As variáveis analisadas via reanálise foram temperatura da superfície do mar, cisalhamento vertical, espessura da camada entre os níveis de 800 e 1000 hPa, umidade relativa do ar em 700 hPa, linhas de corrente e de vorticidade relativa na superfície.

Como referenciado previamente no delineamento da pesquisa apresentado no primeiro capítulo do trabalho, optou-se por empregar os dados de reanálise conjuntamente

com os dados de radiossondagem para avaliar o desempenho dos dados do sensor MODIS. Assim o procedimento de validação das informações de sensoriamento remoto para efeito de levantamento de perfis atmosféricos foi conduzido mediante contraste com dados oriundos de sondagens mais usualmente empregadas. Assim, no caso desta dissertação, no que concerne à reanálise, foi estabelecido o uso de dados de reanálise ECMWF – ERA5. Os dados da reanálise foram obtidos no portal <https://www.ecmwf.int>.

### **2.3. Produtos do sensor MODIS**

Os satélites Aqua e Terra, operados pela NASA, fazem parte do *Earth Observing System* (EOS). O programa EOS é formado por uma série coordenada de satélites de órbita polar e baixa inclinação para observações globais de longo prazo da superfície terrestre, biosfera, terra sólida, atmosfera e oceanos.

Segundo informações da NASA, a bordo do Terra, estão os sensores: *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), *Clouds and Earth's Radiant Energy System* (CERES), *Multi-angle Imaging Spectroradiometer* (MISR), *Measurements of Pollution in the Troposphere* (MOPITT) e MODIS. Em particular, o MODIS é um espectro-radiômetro de 36 bandas que mede a radiação visível e infravermelha (Tabela 2.2).

De acordo com a NASA, a missão do satélite Terra é o monitoramento de mudanças que ocorrem sobre os continentes. Nesse processo, variáveis como variação de calor sensível e latente, conteúdo de água superficial e subterrânea, conteúdo de água nas nuvens, variabilidade da concentração de gases estufa, entre outros, são obtidos e disponibilizados de forma gratuita.

**Tabela 2.2** - Especificações de banda infravermelha MODIS: largura de banda ( $\mu\text{m}$ ), radiância espectral ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ) e diferença de temperatura equivalente ao ruído -  $\text{NE}[\Delta]\text{T}$  (K). Fonte: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php> e Borbas *et al.* (2006).

Uso Primário	Banda	Largura da Banda <sup>1</sup>	Radiância Espectral <sup>2</sup>	$\text{NE}[\Delta]\text{T}(\text{K})^3$
Perfil de Temperatura	25	4.482 - 4.549	0.59 (275K)	0.25
Perfil de Umidade	27	6.535 - 6.895	1.16 (240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18 (250K)	0.25
	29	8.400 - 8.700	9.58 (300K)	0.05
Ozônio	30	9.580 – 9.880	3.69 (250K)	0.25
Temperatura da Superfície	31	10.780 - 11.280	9.55 (300K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94 (300K)	0.05
Perfil de Temperatura	33	13.185 - 13.485	4.52 (260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76 (250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11 (240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08 (220K)	0.35

<sup>1</sup> Bandas 20 a 36 estão em  $\mu\text{m}$ ;

<sup>2</sup> Os valores de radiância espectral são dados em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ; <sup>3</sup>  $\text{NE}(\Delta)\text{T}$  - diferença de temperatura equivalente ao ruído;

<sup>4</sup> Relação sinal-ruído.

No sistema do satélite Terra, juntamente a outros instrumentos como CERES e MISR, o MODIS auxilia o estudo dos impactos das nuvens e aerossóis no balanço de

energia da Terra. O sensor pode registrar a frequência e a distribuição da cobertura de nuvens tanto quanto medir as suas propriedades. A distribuição e o tamanho das gotículas nas nuvens de água líquida e de gelo são produtos gerados (Baum e Platnick, 2006).

#### **2.4. Análise do perfil atmosférico vertical com produtos do MODIS e produtos de outros satélites**

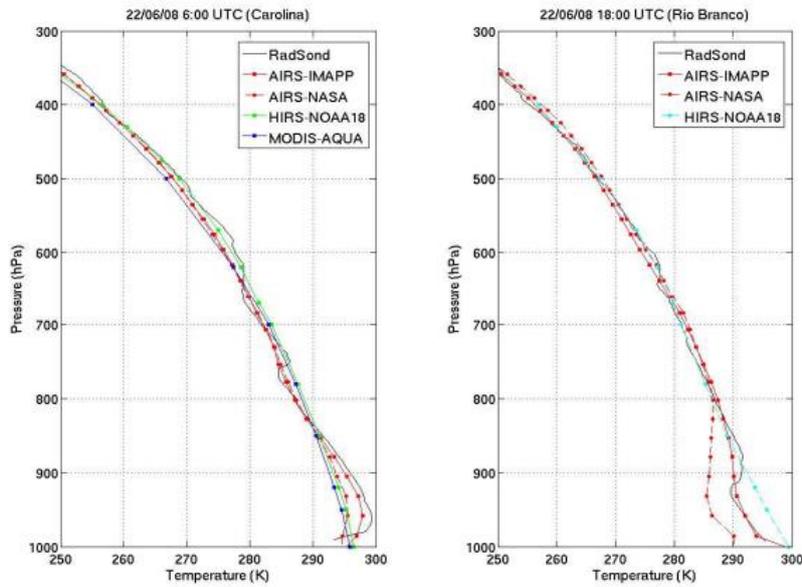
O estudo de perfil vertical atmosférico por satélite é uma abordagem relativamente nova, tendo Wark (1961) como pioneiro. Wark propôs uma análise vertical por satélite para medir perfis de temperatura atmosférica. O primeiro instrumento de sondagem por satélite, SIRS-A, foi lançado no NIMBUS-3 em 1969 (Wark and Hilleary, 1970). Sucessivos instrumentos experimentais na série NIMBUS de satélites em órbita polar levaram ao desenvolvimento da série TIROS-N de satélites operacionais em órbita polar em 1978. Mais adiante, em 1978, na série de satélites TIROS-N, foi introduzido o sensor *TIROS Operational Vertical Sounder* (TOVS, Smith *et al.*, 1979), composto pelo *Sounder* de radiação infravermelha de alta resolução (HIRS), a unidade de som de micro-ondas (MSU) e a unidade de som estratosférico (SSU). O primeiro instrumento de sondagem a bordo de um satélite geostacionário foi o *GOES VISSR Atmospheric Sounder* (VAS) (Smith *et al.*, 1981) lançado em 1980.

Tratando-se dos sensores a bordo dos satélite AQUA-TERRA, Seemann *et al.* (2003) desenvolveram um algoritmo para a extração de informações de temperatura, umidade e ozônio do sensor MODIS em dias/noites de céu claro. Com esses dados, foi calculada a água precipitável (PW) e comparada com as informações obtidas do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), com sondagens sobre a região e com informações obtidas na superfície (radiômetro de micro-ondas). A área de estudo foi Oklahoma nos Estados Unidos durante o período de dezembro de 1999 a maio de 2002. Os autores observaram que a raiz do erro quadrático médio (RMSE) de água precipitável (PW) entre os resultados do MODIS e as informações obtidas na superfície foi de 4,1 mm. Contudo foi também observado que houve diferença significativa do RMSE em períodos secos ( $PW < 17$  mm) e em períodos mais úmidos. Em períodos mais secos, as informações do MODIS tendem a superestimar PW em relação a outras fontes em 3,7 mm, em média.

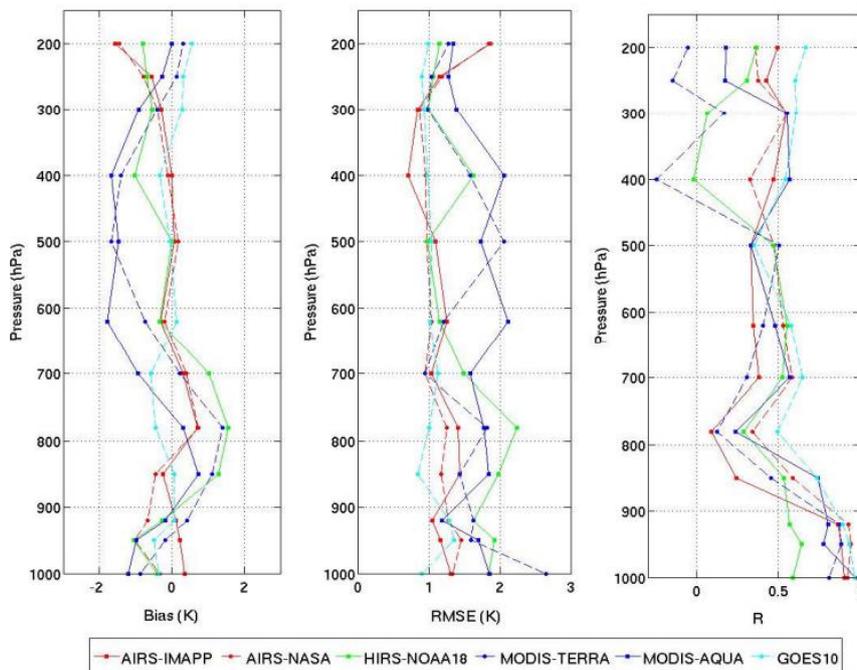
Da Costa *et al.* (2008) compararam os perfis verticais de temperatura, umidade do ar, pressão gerados pelos sensores MODIS, AIRS, GOES10 e HIRS com radiossondagens

lançadas sobre a região amazônica. As medidas estatísticas utilizadas foram a correlação (R), bias (K) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). A Figura 2.6a mostra os resultados dos perfis de temperatura do ar, enquanto a Figura 2.6b ilustra os resultados das métricas comparando as sondagens entre as diferentes fontes.

(a)



(b)



**Figura 2.6** – Resultados de perfis atmosféricos sobre a região amazônica com diferentes fontes: (a) temperatura do ar (°C), (b) bias, RMSE e correlação entre diferentes fontes e radiossondagens. Fonte: Da Costa *et al.* (2008).

Analisando as curvas referentes ao MODIS da Figura 2.6, é possível observar que o viés entre MODIS e as sondagens varia conforme o nível atmosférico. Nos níveis mais próximos à superfície, o viés é positivo, especialmente com MODIS/TERRA, passando a valores negativos acima de 800 hPa. Com relação ao RMSE, notam-se maiores valores próximos à superfície no contraste com dados MODIS/TERRA, identificando-se valores de RMSE > 2,0 K. Por outro lado, a correlação entre MODIS e as sondagens mostra-se maior também mais próximo à superfície.

Rahimzadegan e Mobasheri (2010) desenvolveram um procedimento de duas etapas com o objetivo de melhorar as informações de perfil vertical de temperatura do ar extraídas do MODIS em dias de céu limpo sobre o aeroporto de Mehrabad ao sul do Tehran, capital do Iran. Os autores utilizaram radiossondagens como parte do modelo e base comparativa de dados.

**Tabela 2.3** - Resultados de RMSE entre MODIS e sondagens antes e depois da aplicação de procedimento de duas etapas. Fonte: Rahimzadegan e Mobasheri (2010).

Data	RMSE (K) MOD07	RMSE (K) - saída de modelo para perfil de temperatura do ar	RMSE (K) - saída do modelo com correção
02/06/2007	7,21	4,04	0,38
05/06/2007	6,79	2,72	1,73
11/06/2007	6,21	3,44	1,32
21/06/2007	8,41	5,41	3,86

Os resultados brutos da comparação entre radiossondagens e MODIS mostram RMSE maiores que 6,0 K. Aplicando a metodologia proposta no trabalho referenciado, os autores puderam reduzir o valor de RMSE entre radiossondagem e MODIS em todos os casos analisados.

Chrysoulakis *et al.* (2003) desenvolveram um trabalho cujo objetivo era comparar índices de instabilidade atmosférica derivados do produto MYD07\_L2 do MODIS/AQUA com índices de instabilidade provenientes de oito estações de altitude (radiossondagens). A área de estudo foi a região de Kastoria no noroeste da Grécia, e o período analisado foi o mês de maio de 2003. O estudo utilizou os índices Boyden Index (BI), K e LI. Os autores desenvolveram um estudo de caso no dia 16 de maio de 2003 às 1200 UTC, no qual nenhuma atividade de instabilidade específica foi registrada nas

estações de radiossonda nas adjacências de Kastoria. Entretanto foram registrados 11 mm.h<sup>-1</sup> no aeroporto de Kastoria. Então, os dados do MODIS foram utilizados na análise do perfil atmosférico nesse dia. A região do aeroporto de Kastoria, a partir do MODIS/AQUA, forneceu os seguintes indicadores: BI = 95,44, LI = 0 e K = 21,70. A combinação dos valores dos três índices mostra que esse dia pode ser considerado instável. Assim, o resultado permite a interpolação espacial dos índices em áreas onde não existem dados disponíveis. Os autores concluem que os dados detectados remotamente podem contribuir grandemente na avaliação da instabilidade atmosférica.

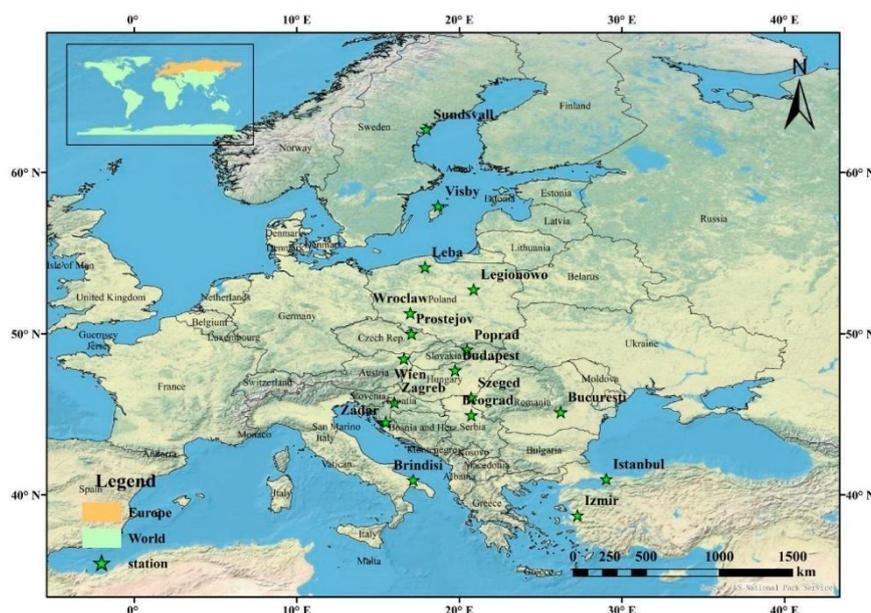
Em seu trabalho, Sobrino *et al.* (2014) avaliaram os resultados do produto MOD07 do MODIS acoplado ao satélite Terra por uma comparação com dados de nove estações de altitude. A região de estudo foi a Península Ibérica do ano de 2000 ao ano de 2010. Apesar das limitações do MODIS em comparação com outros instrumentos de sondagem, a validação forneceu resultados satisfatórios, com desvio (MOD07 menos radiossonda) menor que 0,3 cm e desvio padrão de 0,5 cm para o vapor de água total da coluna e desvio de 1 K com desvios padrão entre 2 K e 3 K para a temperatura do ar em diferentes níveis de pressão. Em média, o viés foi positivo e abaixo de 2 K com desvio padrão em torno de 5 K para o caso de temperatura do ponto de orvalho. Grandes erros foram encontrados, neste caso, para níveis de pressão superiores a 50 hPa.

Bungtong *et al.* (2020) examinaram espacialmente e temporalmente as variações de vapor de água precipitável sobre a Tailândia de 2009 a 2015. Foram utilizadas informações da reanálise ERA-Interim (1981-2017), radiossondagens e os produtos MOD08\_M3 (Terra) e MYD08\_M3 (Aqua) nas regiões de Bangkok, Singapura, Kuala Lumpur e Danang. A reanálise foi comparada em pares com as outras fontes de dados utilizando algumas métricas de erro, notadamente coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro médio de viés (*mean bias error*) (MBE) (Tabela 2.4). Foi observado, em relação ao contraste MODIS x ERA-Interim, um RMSE médio de 0,429 cm.

**Tabela 2.4** - Comparação de ERA-Interim versus Sondagens e ERA-Interim versus MODIS. Fonte: Bungtong *et al.* (2020).

Estação	ERA-Interim x Sondagem				ERA-Interim x MODIS			
	R <sup>2</sup>	MBE (cm)	RMSE (cm)	N	R <sup>2</sup>	MBE (cm)	RMSE (cm)	N
Bangkok	0,95	-0,025	0,244	70	0,91	0,014	0,283	84
Singapura	0,82	-0,068	0,169	84	0,35	0,170	0,339	83
Kuala Lumpur	0,74	-0,0144	0,242	71	0,16	0,293	0,463	83
Danang	0,98	-0,296	0,359	83	0,75	0,370	0,571	84

Yang *et al.* (2020) também promoveram uma comparação entre diferentes reanálises, radiossondagens e produtos de satélite incluindo MYD07 do satélite Aqua. A região de estudo distribuiu-se em 17 estações pelo continente europeu como mostra a Figura 2.7.



**Figura 2.7** – Regiões de estudo Yang *et al.* (2020). Fonte: Yang *et al.* (2020).

Um das etapas do estudo consistiu na análise de seis perfis atmosféricos nos seguintes dias e locais: 1 de janeiro de 2018 na estação Bucaresti lnh-Banesa, 30 de abril de 2018 na estação de Istanbul, e 11 de agosto de 2018 na estação de Izmir.

Segundo os autores, as maiores discrepâncias foram observadas com o perfil atmosférico do produto MYD07. Observou-se que as temperaturas do ar extraídas do MYD07 entre os níveis 500 hPa a 1000 hPa superaram em 3 K a 7 K àquelas observadas

nas radiossondagens. Entre 10 hPa e 300 hPa, as diferenças foram de 2 K a 5 K. Além disso, foi observado que, em comparação à temperatura do ar, as discrepâncias dos perfis verticais de temperatura do ponto de orvalho foram ainda maiores chegando a 12 K entre 10 km a 50 km (aproximadamente de 1 hPa a 300 hPa) e entre 5 K e 8 K em níveis médios (500 hPa a 800 hPa).

Existem diversos outros sensores em diferentes satélites que fornecem informações de variáveis como temperatura do ar e vapor de água ao longo da atmosfera vertical. Alguns deles podem fornecer informações de perfil atmosférico em condições de céu encoberto por nuvens. Os sensores *Advanced Technology Microwave Sounder* (ATMS) e *Cross-track Infrared Sounder* (CrIS) (NOAA/NASA), a bordo dos satélites Suomi NPP e NOAA-20, fornecem informações de temperatura atmosférica, pressão atmosférica e umidade do ar. Trabalhando na faixa de micro-ondas, o ATMS tem a capacidade de obter informações em píxeis com nuvens. Já o CrIS trabalha na faixa do infravermelho obtendo informações com alta resolução em píxeis não contaminados por nuvens.

## 2.5. Limitações do sensoriamento remoto

Ao se tratar de sensoriamento remoto, o processo para a obtenção dos dados é complexo visto que envolve a solução de equações de transferência radiativa espectralmente independentes além da utilização de dados auxiliares que delimitam o conjunto de soluções (Borbas *et al.*, 2006).

Na determinação dos perfis de temperatura e de umidade por satélite, um dos possíveis métodos é gerar uma primeira estimativa (*first guess*) para um algoritmo de recuperação física utilizando relações estatísticas previamente determinadas entre a radiação observada (ou modelada) e os perfis atmosféricos correspondentes. Em seu trabalho, Smith *et al.* (1970) descreve tal algoritmo de regressão estatística para temperatura atmosférica. Partindo do pressuposto de céu livre de nuvens, a radiação recebida no topo da atmosfera  $R(v_j)$  é a soma das radiações provenientes da superfície da Terra e de cada nível  $i$  de todos os  $N$  níveis da atmosfera dada por

$$R(v_j) = \sum_{i=1}^N B[v_j, T(p_i)]w(v_j, p_i) \quad (2.1)$$

onde  $w(v_j, p_i) = \varepsilon(v_j, p_i)\tau(v_j, p_i)$  é uma função peso de contribuição de cada nível atmosférico,  $B[v_j, T(p_i)]$  é a radiação de Planck para cada nível atmosférico  $i$  à

temperatura  $T$ ,  $\varepsilon(v_j, p_i)$  é a emissividade espectral de cada nível atmosférico  $i$ , e  $\tau(v_j, p_i)$  é a transmitância espectral da atmosfera acima de cada nível  $i$ .

O desafio é determinar a temperatura e a umidade a partir de  $R$  valores de radiância; sendo esses valores  $R$  interdependentes, logo, não há uma solução única. Sendo os perfis de temperatura e de umidade determinados a partir dos valores  $R$ , pequenos erros nesses valores podem produzir grandes erros nos perfis. Então, a solução de 2.1 é reorganizada em uma equação linearizada

$$R(v_j) - R_0(v_j) = \sum_{i=1}^N \{B[v_j, T(p_i)] - B[v_j, T_0(p_i)]\} [w(v_j, p_i) + e(v_j)] \quad (2.2)$$

onde  $e(v_j)$  é o erro associado à radiância observada.

A seguir, a função de Planck é linearizada para a obtenção do perfil de temperatura ( $T$ ) gerando a seguinte solução inversa

$$T(p_j) - T_0(p_i) = \sum_{j=1}^R A(v_j, p_i) [R(v_j) - R_0(v_j)] \text{ ou } T = AR \quad (2.3)$$

onde  $A(v_j, p_i)$  é um operador linear.

Esse algoritmo de regressão estatística busca o melhor operador possível. Para essa seleção, são utilizados dados de temperatura e de umidade obtidos de radiossondagem. Para determinar os coeficientes de regressão  $A$ , os valores de radiância do MODIS seriam trabalhados junto aos perfis obtidos com as radiossondagens. Entretanto, como as radiossondagens são lançadas somente em dois horários globalmente, nem sempre é possível obter dados simultâneos do MODIS e das sondagens sobre o mesmo local.

Então, uma possível solução é determinar os coeficientes de regressão a partir dos valores de radiância do MODIS calculados por um modelo de transmitância cuja entrada é o banco global de dados de perfil de temperatura e umidade por radiossondas. Assim, não é necessário ter valores de radiância do MODIS sincronizados aos dados de sondagens, sendo apenas necessário o dado de perfil histórico. No entanto, o método utiliza cálculos de transferência radiativa e requer um modelo avançado e preciso para obter uma relação de regressão confiável. Também é importante destacar que, no algoritmo MOD07 Collection 6, os ajustes de viés da radiância não são implementados.

Outra limitação dos produtos MODIS é a presença de nuvens. A complexa solução do problema inverso para determinar temperatura e umidade parte do princípio de céu sem nuvens visando facilitar o processo computacional. Contudo, na realidade, a ocorrência de dias e noites de céu perfeitamente limpos é pequena, especialmente em lugares de clima tropical como o Rio de Janeiro. A presença de nuvens representa uma limitação frequente no que tange à utilização de produtos de satélites na estimativa de parâmetros da superfície terrestre.

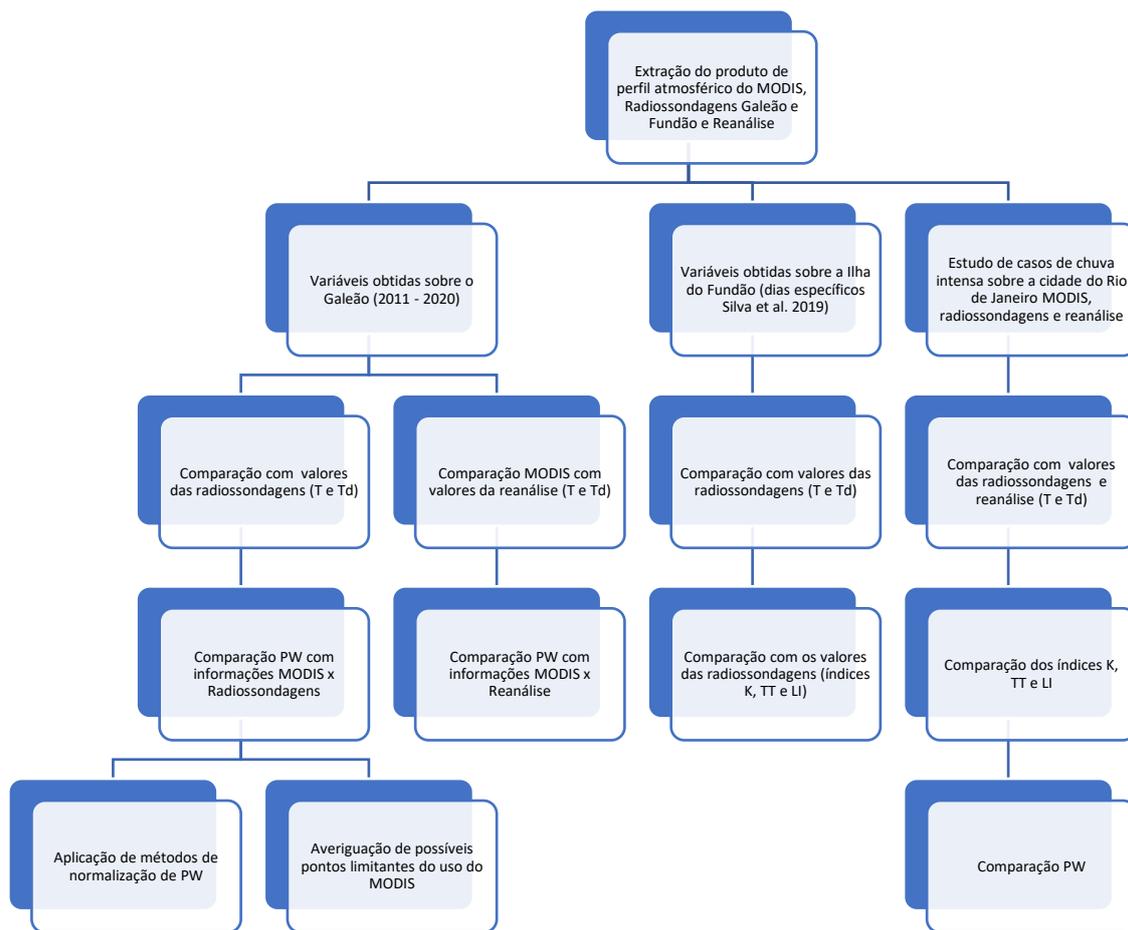
O desafio de superar essa limitação inspirou o desenvolvimento de técnicas de detecção de píxeis com nuvens para posterior preenchimento de informações anteriormente perdidas. As técnicas têm como base o uso de limiares que determinam a presença ou não de nuvens. Os limiares, por sua vez, são calculados a partir da análise entre os diferentes valores de reflectância e de temperatura de brilho observados em cada píxel das imagens. À guisa de exemplo, coerência espacial (Coakley e Bretherton, 1982), método de classificação (Liljas, 1987), técnica do limiar bruto (Saunders, 1986) e técnica nova coerência (Thiermann e Ruprecht, 1992) são alguns dos procedimentos utilizados na detecção de nuvens por imagens de satélite.

Os produtos do MODIS, na maioria dos trabalhos, são utilizados em condições de céu limpo. Entretanto, existem alguns trabalhos que utilizaram algoritmos de detecção de nuvens e preenchimento de dados nas imagens do MODIS. Feng *et al.* (2015), por exemplo, utilizaram o método de preenchimento de falhas (*gap filling*) nos píxeis contaminados por nuvens nos produtos do sensor MODIS/AQUA sobre a região do rio Heihe no noroeste da China. O método baseava-se no preenchimento das informações faltantes por dados obtidos do dia de céu limpo mais próximo.

### Capítulo 3 – Metodologia

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia aplicada no presente trabalho, que tem como objetivo avaliar a qualidade do produto de perfil atmosférico do sensor MODIS tendo como comparação os valores de temperatura do ar (T), temperatura do ponto de orvalho (Td), água precipitável (PW) e, mais adiante, alguns indicadores de comportamento termodinâmico e dinâmico da atmosfera, notadamente o índice K, *Total Totals* (TT) e índice de levantamento (*Lifted*) (LI).

A primeira etapa do trabalho foi a extração do produto do MODIS na última década (2011-2020) seguido da extração e análises comparativas com informações das radiossondagens e reanálise sobre a o Aeroporto Internacional do Galeão e sobre a Ilha do Fundão. A terceira etapa foi a análises de dois casos de chuva intensa aplicando informações do MODIS. A Figura 3.1 apresenta uma síntese da metodologia aplicada neste trabalho.



**Figura 3.1** – Esquema do fluxograma metodológico com as etapas do trabalho.

### 3.1. Radiosondagens

As radiosondagens utilizadas neste trabalho foram lançadas no Aeroporto Internacional do Galeão no período de 2011 a 2020, disponíveis em <<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>. O período foi escolhido segundo o objetivo de se examinar a última década que contemplou diversos eventos de chuva intensa como o de janeiro de 2011 em Nova Friburgo-RJ, além de abranger, por exemplo, o evento que ocorreu em abril de 2011 na cidade do Rio de Janeiro e o evento de fevereiro de 2018 também na cidade do Rio de Janeiro, entre outros. Também foram utilizadas algumas das radiosondagens lançadas entre 2016 e 2018 pelo Laboratório de Recursos

Hídricos e Estudos do Meio Ambiente (LABH2O) do Programa de Engenharia Civil do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), lançadas a partir do Instituto de Geociências (IGEO) localizado na Cidade Universitária - Ilha do Fundão. Tais radiossondagens fizeram parte da tese de doutorado de Silva (2019).

Em Silva (2019), as radiossondagens utilizadas foram separadas conforme o sistema atmosférico predominante. Os sistemas identificados foram: tempestades convectivas (TC), sistemas frontais (SF) e ZCAS. A Tabela 3.1 apresenta as datas das radiossondagens e as condições atmosféricas observadas.

**Tabela 3.1** – Datas das radiossondagens lançadas e as condições atmosféricas observadas nos respectivos dias. Fonte: Silva (2019).

Datas das radiossondagens	Condições Atmosféricas
17/11/2016, 12/12/2016, 02/01/2017, 03/01/2017, 06/01/2017, 12/01/2017, 13/02/2017, 06/03/2017, 13/03/2017, 24/03/2017, 11/01/2018, 12/01/2018, 13/01/2018, 15/01/2018, 16/01/2018, 17/01/2018, 22/01/2018, 23/01/2018, 25/01/2018, 01/03/2018, 02/03/2018, 03/03/2018, 08/03/2018, 15/03/2018	TC
18/11/2016, 29/11/2016, 03/01/2018, 16/03/2018	SF
19/01/2017, 22/02/2018	ZCAS

### 3.2. Produto MOD07\_L2 e limitações

No presente trabalho, o produto do MODIS utilizado foi o MOD07\_L2, que fornece o perfil de temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, altura geopotencial, índice K, *Total Totals* (TT), *Lifted* (LI), entre outros. Os produtos são obtidos em 20 bandas distintas, sendo cada uma delas determinada nos seguintes níveis isobáricos (hPa): 5, 10,

20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 620, 700, 780, 850, 920, 950 e 1000. A resolução espacial do produto é de 5,0 km x 5,0 km.

Cada arquivo de imagem MOD07\_L2 cobre um intervalo de cinco minutos, o que significa uma grade de saída de 270 píxeis de 5,0 km de largura por 406 píxeis de 5,0 km de comprimento para nove grânulos consecutivos.

A fim de promover a comparação entre o produto do satélite, as radiossondagens, e os dados medidos *in situ*, foram empregadas as variáveis temperatura do ar (T), temperatura do ponto de orvalho (Td), índice K (K), *Total Totals* (TT) e LI nos níveis isobáricos 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 620, 700, 780, 850, 925 e 1000 (hPa) em conjunto com a temperatura coletada na superfície.

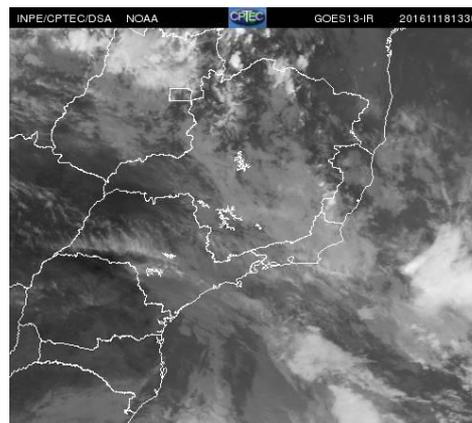
Os dados das imagens do MODIS foram acessados por meio do portal *Earth Observing System Data*, <https://www.earthdata.nasa.gov/>, observando-se que as imagens diárias dos períodos de análise foram acessadas através de um código computacional em *shell script* ([https://pt.wikipedia.org/wiki/Shell\\_script](https://pt.wikipedia.org/wiki/Shell_script)). As informações dos valores meteorológicos foram extraídas na região de interesse por meio do uso da biblioteca GDAL *Geospatial Data Abstraction Library*- <https://gdal.org/>. Com a implementação desse tipo de automatização de procedimentos, foi possível baixar e analisar centenas de imagens permitindo a extração dos dados para a área de estudo.

As informações de perfil de temperatura e de umidade atmosférica são obtidas pelo sensor no canal infravermelho, registrando-se que, portanto, a presença de nuvens impossibilita a leitura dos píxeis nessa faixa do espectro eletromagnético. A Figura 3.2a apresenta a imagem do produto do MODIS sobre as regiões sudeste e sul do Brasil no dia 18/11/2016 às 1315 UTC, enquanto a Figura 3.2b apresenta uma imagem do satélite Goes-13 no canal infravermelho (IR) às 1330 UTC. Nota-se a presença de muitas nuvens devido à atuação de um sistema frontal (SF) intenso.

(a) MODIS 18/11/2016 às 1315 UTC



(b) Goes-13 18/11/2016 às 1330 UTC



**Figura 3.2** – Imagens de satélite no dia 18/11/2016: (a) sensor MODIS no satélite Terra; (b) Goes-13 canal infravermelho. Fonte: NASA e CPTEC/INPE.

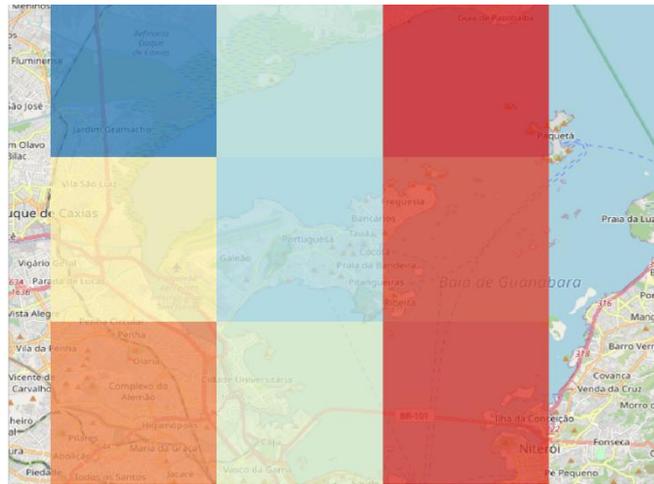
Fica evidente a necessidade da implementação de um procedimento que vise estimar, de forma coerente e consistente, o valor das variáveis sobre as regiões de interesse a partir dos valores vizinhos.

Dado o local de lançamento da radiossondagem, pode-se supor que o diagnóstico emitido a partir de medições realizadas ao longo de sua trajetória ascendente se dá em condições de homogeneidade espacial em um raio de 200 a 300 km (Kursinski *et al.*, 1997). Logo, seria possível prospectar, na vizinhança do local de lançamento, um píxel da imagem não comprometido pela presença de nuvens para estabelecer análise comparativa com as radiossondagens não examinadas.

Uma vez caracterizada a limitação em presença de nuvens, optou-se por examinar, no presente trabalho, datas de perfis atmosféricos estimados pelo MODIS com comprometimento mínimo por nuvens.

### 3.3. Assimilação de dados MODIS

A interpolação das informações do produto MOD07\_L2 foram feitas a partir das médias dos píxeis com a configuração de regiões de 15 km x 15 km abrangendo ambos os locais de estudo, Ilha do Fundão e Ilha do Governador, conforme mostra a Figura 3.3. Os valores máximos, mínimos e desvios padrões também foram computados.



**Figura 3.3** – Recorte dos píxeis dos dados MODIS com aplicação de uma matriz 3 X 3 e resolução espacial de 5,0 km para cada píxel sobre a região de interesse.

### 3.4. ECMWF - ERA 5

Na avaliação proposta para os dados MODIS, julgou-se interessante empregar uma fonte alternativa de dados para o melhor entendimento de potenciais semelhanças e diferenças entre dados MODIS e dados oriundos de sondagens, de forma a melhor complementar o procedimento de validação do MODIS quanto ao levantamento de perfis atmosféricos. Assim, foi estabelecido o uso de dados de reanálise ECMWF – ERA5. Os dados da reanálise foram obtidos no portal <https://www.ecmwf.int>. Foram desenvolvidos códigos computacionais para acessar e extrair a informação.

A reanálise ECMWF – ERA5 reúne dados coletados *in situ*, informações de satélites e saídas de modelo numéricos, que, mediante uma interpolação sofisticada, apresenta resultados de alta qualidade. A resolução horizontal é de 31 km, sendo possível obter informações a partir de 1950, notando-se que a atualização de dados ocorre a cada hora. A formulação ERA 5 substituiu a formulação ERA-Interim em 2019, utilizando-se, agora, o modelo *Integrated Forecasting System* (IFS) Cy41r2 de 2016 (Hersbach *et al.*, 2020) em vez do IFS Cy31r2 de 2006 (Dee *et al.*, 2011). Para estimar o comportamento da atmosfera numa determinada região e ao longo de certo período de tempo, ERA 5 utiliza o sistema 4D-Var (Bonavita *et al.*, 2016). Esse sistema tem como objetivo encontrar a melhor estimativa baseando-se em valores da saída de modelos de previsão e dados observacionais.

### 3.5. Água Precipitável

O vapor de água presente na atmosfera é um parâmetro de extrema importância na determinação dos processos termodinâmicos e dinâmicos. Uma das variáveis mais comumente utilizadas para mensurar a quantidade de vapor de água verticalmente é a água precipitável (*precipitable water*). Essa variável representa a integração vertical da razão de mistura do vapor de água. Em outras palavras, PW expressa a quantidade de água que poderia ser obtida na coluna atmosférica se todo o vapor de água presente condensasse. O cálculo de tal variável é feito em três etapas (Viessman e Lewis, 2003): (i) calcula-se a pressão de vapor ( $e$ ); (ii) determina-se a razão de mistura ( $w$ ); (iii) estima-se a água precipitável (PW). No presente trabalho, PW representa o conteúdo de água precipitável em toda a coluna atmosférica, isto é, de 1000 hPa a 30 hPa.

Inicialmente, adota-se a pressão de vapor dada por

$$e = 6,11 \times 10^{\left(\frac{7,53 \times T_d}{237,7 + T_d}\right)} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.1)$$

onde:  $T_d$  é a temperatura do ponto de orvalho ( $^\circ\text{C}$ ) em cada nível isobárico.

Assumindo-se a razão de mistura descrita pela relação

$$w = 621,97 \times \frac{e}{P - e} \text{ [g/kg]} \quad (3.2)$$

onde  $P$  é a pressão correspondente ao nível para o qual está sendo calculada a razão de mistura, chega-se ao conteúdo de água precipitável expresso por

$$PW = \frac{1}{g} \left( \left( \overline{w_{P_i P_{i+1}}} \right) (P_{i+1} - P_i) \right) \text{ [mm]} \quad (3.3)$$

onde:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  é a aceleração da gravidade,  $\overline{w_{P_i P_{i+1}}}$  é a média das razões de mistura entre dois níveis isobáricos, e  $P_{i+1} - P_i$  é a diferença entre as pressões nesses dois níveis.

### 3.6. Avaliação do desempenho do MOD07\_L2

#### 3.6.1. Avaliação estatística da assertividade das temperaturas

Na avaliação estatística da compatibilidade entre os dados de radiossonda, reanálise e do MODIS, foi utilizada a correlação ( $r$ ) na forma dada por

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) - (y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} \quad (3.4)$$

onde:  $x_i$  é a temperatura em cada nível proveniente da radiossondagem ou da reanálise obtida por meio do modelo ECMWF;  $y_i$  é a temperatura em cada nível proveniente do MODIS;  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são médias amostrais das séries de temperaturas; e  $s_x$  e  $s_y$  são os desvios padrões das séries de temperaturas.

A correlação trata-se de medida adimensional do grau de relação linear entre duas variáveis. Pode assumir um valor entre -1 e +1. Os resultados mais próximos de +1 indicam que as variáveis aumentam ou diminuem conjuntamente de forma linear. Por outro lado, se uma variável tende a aumentar à medida que a outra diminui, o coeficiente é negativo. Além disso, segundo Wilks (1995), uma correlação forte está presente em valores abaixo de -0,7 e acima de 0,7.

Ainda na avaliação da compatibilidade das temperaturas oriundas das diferentes fontes, foi calculada a raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Wilks, 1995) a fim de mensurar a distância entre os valores dessas variáveis. A medida do RMSE é dada pela seguinte equação:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3.5)$$

O cálculo do viés, aqui chamado BIAS, também foi utilizado para verificar se os valores fornecidos pelo MODIS superestimam ou subestimam as medidas das sondagens/reanálise. O BIAS é dado pela seguinte equação:

$$\text{BIAS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - x_i \quad (3.6)$$

Assim, BIAS positivos indicam que os valores do MODIS superam ou superestimam, enquanto BIAS negativos revelam que os valores das sondagens e das reanálises estão sendo subestimados.

Adicionalmente, foi utilizado o coeficiente Kling-Gupta Efficiency (KGE) (Gupta *et al.*, 2009) na avaliação da confiabilidade do produto do MODIS em relação às outras fontes de dados, conforme a expressão

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{MODIS}}{\sigma_{obs}}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{MODIS}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (3.7)$$

onde:  $r$  é a correlação,  $\sigma_{MODIS}$  é o desvio padrão dos valores MODIS,  $\sigma_{obs}$  é o desvio padrão das sondagens e das observações de reanálise do modelo ECMWF,  $\mu_{MODIS}$  é média dos valores obtidos com o produto do MODIS, e  $\mu_{obs}$  é a média dos valores das sondagens e das observações de reanálise do modelo ECMWF.

Resultados positivos e mais próximos de KGE igual a 1 mostram boa ou excelente concordância entre as fontes analisadas, enquanto valores negativos denotam baixa ou insuficiente concordância.

### 3.6.2. Avaliação quantitativa e estatística da assertividade dos índices de instabilidade

Os índices de instabilidade atmosférica foram comparados estatisticamente com procedimento de análise da probabilidade de detecção (POD) versus razão de falso alarme (FAR) para avaliar a performance das medidas.

Segundo a metodologia proposta por Wilks (1995), além dos índices POD e FAR, existem outros índices dicotômicos criados para caracterizar a eficiência de procedimentos ou resultados, como a acurácia (AC) e a taxa de sucesso (SR). Tais indicadores podem ser calculados utilizando a tabela de contingência (Tabela 3.2) (Wilks, 1995; Baldwin e Kain, 2006).

**Tabela 3.2** - Tabela de contingência.

		Observado (OB)		
		Sim	Não	Total
Previsto (PT)	Sim	Acerto (a)	Alarme falso (b)	PT Sim
	Não	Não previsto (c)	Correto negativo (d)	PT Não
	Total	OB Sim	OB Não	Total

Acurácia (em inglês, *accuracy* - AC) é definida como o grau médio de correspondência entre os pares de estimativas e observações. A acurácia representa um dos muitos aspectos da qualidade das estimativas que pode ser obtida a partir da distribuição conjunta de estimativas e observações na forma:

$$AC = \frac{a+d}{a+b+c+d} \quad (3.8)$$

Taxa de sucesso (em inglês, *success ratio* - SR) informa a probabilidade de um evento observado, dado que foi estimado. É sensível a falsos alarmes, mas ignora as falhas, sendo estimado por:

$$SR = \frac{a}{a+b} \quad (3.9)$$

A probabilidade de detecção (em inglês, *probability of detection* - POD) é sensível à fração da região observada que foi bem estimada ou prevista, que pode variar de zero a um, dada por:

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (3.10)$$

A razão de alarme falso (em inglês, *false alarm ratio* - FAR) representa a fração da área estimada ou prevista que não ocorreu, sendo definida como:

$$FAR = \frac{b}{b+d} \quad (3.11)$$

Para a utilização da tabela de contingência (Tabela 3.3), é necessária a existência de eventos dicotômicos. Assim, para a aplicação do procedimento proposto, foram considerados dois cenários: (1) os índices apresentados na radiossondagem e estimados pelo MOD07\_L2 mostram condições atmosféricas favoráveis à ocorrência de chuva intensa (coluna “Sim”); e (2) os mesmos índices não apontam condições favoráveis à ocorrência de chuvas (coluna “Não”). O fluxograma caracterizado na Figura 3.4 explicita o procedimento para contabilização dos elementos da tabela de contingência. Na determinação da classificação “favorável ou não favorável”, a ocorrência de chuva intensa foi determinada segundo os limiares propostos por Nascimento (2005) (Tabela 3.3).



**Figura 3.4** – Fluxograma para confecção da tabela de contingência binária quanto às condições atmosféricas para ocorrência ou não de chuva e estimativas do MODIS.

**Tabela 3.3** – Valores limítrofes para índices de instabilidade. Fonte: Nascimento (2005).

Índice	Valores Limítrofes	
	Instabilidade	Instabilidade extrema
K (°C)	$30 \leq K \leq 40$	$K > 40$
TT (°C)	$40 \leq TT \leq 50$	$TT > 50$
LI (°C)	$-10 \leq LI \leq -5$	$LI < -10$

É importante destacar que existem diversos outros índices termodinâmicos e dinâmicos frequentemente usados na análise da instabilidade atmosférica (sessão 2.1), contudo, sendo o objetivo do presente trabalho a avaliação do produto do MODIS, optou-se por analisar os índices K, TT e LI, uma vez que fazem parte do produto. Tais índices

são recebidos já calculados no momento de extração das informações mediante a ferramenta MCTK (Apêndice A).

## Capítulo 4 - Resultados Comparativos entre Radiossondagens

Neste capítulo, serão apresentadas as comparações feitas entre as variáveis temperatura do ar (T), temperatura do ponto de orvalho (Td) e água precipitável (PW) sobre o Galeão de radiossondagem e de reanálise com as informações do sensor MODIS, objeto de investigação da presente dissertação. Também foram analisados dias específicos sobre a região da Ilha do Fundão com as variáveis T e Td, índices K, Total Totals (TT) e LI.

### 4.1. MODIS versus sondagens GIG (2011 – 2020)

Na análise das informações provenientes do produto do MODIS, decidiu-se trabalhar primeiramente com valores médios encontrados sobre a região de estudo. As tabelas a seguir mostram a correlação, RMSE e BIAS entre as variáveis temperatura do ar (Tabela 4.1a) e temperatura do ponto de orvalho (Tabela 4.1b) do MODIS e das sondagens do Galeão em cada nível isobárico.

**Tabela 4.1** – Estatísticas MODIS versus Sondagens: (a) temperatura do ar; (b) temperatura do ponto de orvalho.

(a)

Temperatura do ar								
Níveis (hPa)	30	50	70	100	150	200	250	300
Estatísticas								
Correlação	0,12	0,31	0,49	0,57	0,31	0,44	0,59	0,58
RMSE (°C)	2,49	2,63	3,36	2,92	2,67	2,02	2,11	2,33
BIAS (°C)	0,81	0,14	0,41	-0,80	0,18	0,48	0,42	0,15
KGE	-0,03	0,15	0,40	0,57	0,20	0,36	0,57	0,58
Níveis (hPa)	400	500	620	700	780	850	925	1000
Estatísticas								
Correlação	0,63	0,63	0,62	0,61	0,73	0,79	0,83	0,82
RMSE (°C)	2,19	2,14	2,05	2,59	3,06	4,27	3,98	2,36
BIAS (°C)	-0,35	-0,71	-0,59	-1,59	-2,22	-3,68	-3,45	1,25
KGE	0,63	0,62	0,50	0,57	0,67	0,67	0,74	0,78

**Tabela 4.1** – Continuação.

(b)

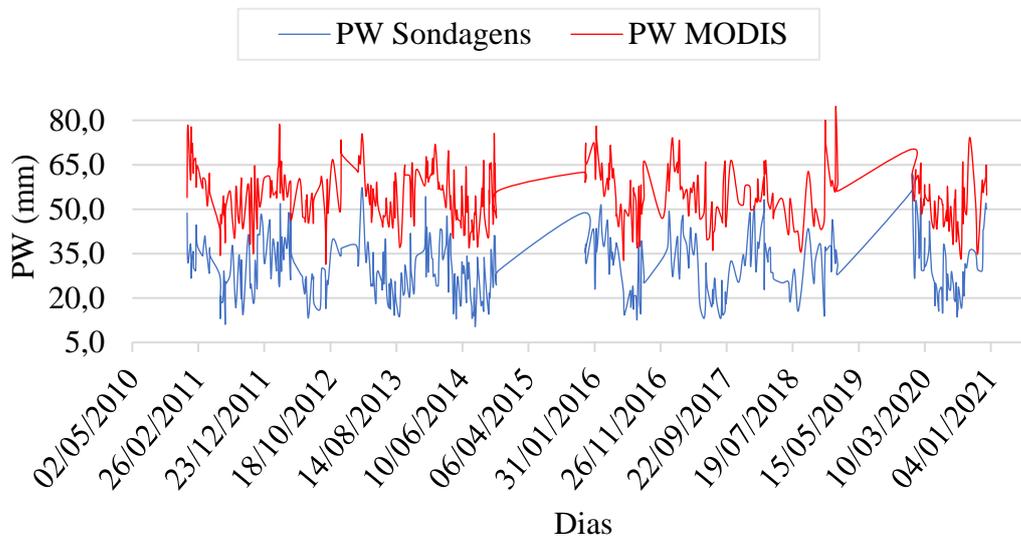
Temperatura do ponto de orvalho								
Níveis (hPa)	30	50	70	100	150	200	250	300
Estatísticas								
Correlação	0,09	0,11	0,12	0,11	-0,11	0,39	-0,03	0,08
RMSE (°C)	31,94	27,62	20,88	16,11	16,44	16,51	17,96	20,35
BIAS (°C)	31,88	27,51	20,61	15,66	15,83	15,43	16,23	18,26
KGE	-0,07	0,00	0,09	0,09	-0,30	0,03	-0,28	-0,21
Níveis (hPa)	400	500	620	700	780	850	925	1000
Estatísticas								
Correlação	0,14	0,12	0,07	0,21	0,16	0,25	0,33	0,56
RMSE (°C)	25,05	28,85	28,36	23,75	15,17	6,80	5,10	4,73
BIAS (°C)	22,30	25,81	24,80	18,85	10,89	4,18	3,11	3,86
KGE	-0,27	-0,42	-0,64	-0,92	-0,85	0,06	0,29	0,51

Analisando essas primeiras informações, é possível notar que os valores de T do produto do MODIS se aproximam mais dos valores das sondagens se comparados aos valores de Td. Para ambos, T e Td, a correlação aumenta conforme o nível da pressão atmosférica aumenta, mostrando que, quanto mais próximo à superfície, mais semelhantes são as informações das diferentes fontes. O máximo RMSE observado para T é 4,27°C em 850 hPa, enquanto, para Td, o valor é muito mais alto, chegando a 31,94°C no nível de 300 hPa. O máximo BIAS para T é -3,6 °C em 850 hPa, o que significa que, nesse nível, os valores do MODIS são inferiores aos valores das sondagens. O máximo BIAS de Td é 31,88°C em 30 hPa, ou seja, nesse nível, os valores do MODIS superam as sondagens. Também é possível perceber que, ao se tratar do BIAS de Td, em todos os níveis, o MODIS apresenta valores mais altos, enquanto, para T, não existe um viés bem definido. O coeficiente KGE para temperatura do ar mostrou melhor concordância em níveis mais próximos à superfície. Já para Td, na maioria dos níveis, a concordância foi insuficiente.

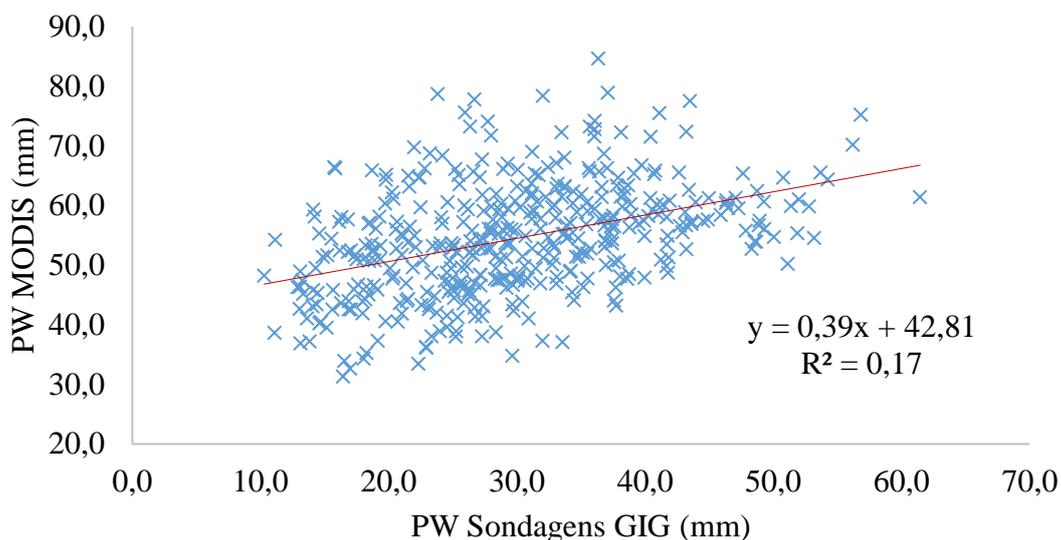
Em ambas as variáveis, é possível notar que o MODIS se aproxima das sondagens nos níveis mais próximos da superfície. Uma explicação possível para essa melhor compatibilidade é a condição de contorno estabelecida na superfície. Assim, os valores obtidos com as medições do MODIS apresentam melhores resultados nos níveis mais próximos ao solo.

#### 4.2. Curvas de PW

Na Figura 4.1, estão apresentadas as curvas com os valores de PW calculadas com Td das sondagens (azul) e do MODIS (vermelho) em toda coluna atmosférica aqui trabalhada. Nos anos de 2015 e 2019, observou-se uma significativa ausência de dados das sondagens do Galeão. Em seguida, na Figura 4.2, encontra-se o gráfico de dispersão de PW.



**Figura 4.1** – PW (mm) calculada com informações das sondagens do Galeão (azul) e MODIS (vermelho).



**Figura 4.2** – Dispersão dos valores de PW (mm) obtidos pelo MODIS em contraste com as sondagens GIG.

Sendo PW calculada segundo Td, é evidente que a superestimação dos valores das sondagens pelo MODIS seja também observada em PW, como fica claro no gráfico da Figura 4.2. Desejou-se investigar o quanto cada estrato da atmosfera influenciou nos resultados de PW. Então, foram obtidas as métricas de correlação, RMSE e BIAS em diferentes partes da atmosfera, sendo discriminadas como segue: 1000 a 30 hPa, 1000 a 620 hPa, 1000 a 100 hPa, 620 a 30 hPa e 620 a 100 hPa (Tabela 4.2).

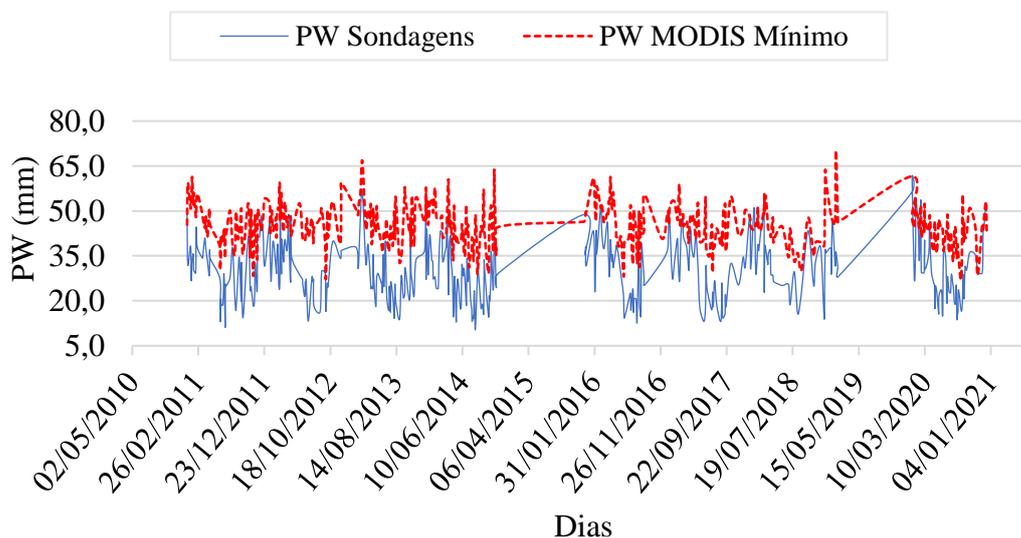
**Tabela 4.2** – Estatísticas de PW em diferentes partes da atmosfera.

PW					
Níveis (hPa)	1000 a	1000 a	1000 a	620 a	620 a
Estatísticas	30	620	100	30	100
Correlação	0,41	0,38	0,41	0,16	0,16
RMSE (°C)	26,65	17,69	26,56	14,37	14,28
BIAS (°C)	24,60	15,36	24,50	13,66	13,55
KGE	-0,01	0,16	-0,01	-2,11	-2,09

Analisando a Tabela 4.2, fica notória a redução da correlação e do coeficiente KGE em níveis mais altos. Entretanto, o RMSE e o BIAS para PW diminuem quando adicionadas camadas mais altas, divergindo do que ocorre quando analisado Td.

#### 4.2.1. Normalizações de PW e PW mínimo

Visando a melhora dos resultados anteriormente apresentados, foram exploradas diferentes maneiras de abordagem dos valores de Td do MODIS e, conseqüentemente, dos valores de PW (MODIS). Primeiramente, foram comparados os valores de Td das sondagens aos valores mínimos de Td do MODIS (Tabela 4.4). Também foi calculada PW com o Td mínimo e comparada a PW calculada com Td das sondagens (Figura 4.3).



**Figura 4.3** - PW calculada com informações das sondagens do Galeão (azul) e PW calculada com Td mínimo do MODIS sobre a região estudo (vermelho).

**Tabela 4.3** - Estatísticas MODIS versus sondagens da temperatura do ponto de orvalho.

Temperatura do ponto de orvalho mínima								
Níveis (hPa)	30	50	70	100	150	200	250	300
Estatísticas								
Correlação	0,09	0,09	0,09	0,11	-0,03	-0,03	-0,06	0,04
RMSE (°C)	31,15	26,78	19,65	14,77	17,68	15,60	17,13	19,51
BIAS (°C)	31,08	26,66	19,36	14,29	17,10	14,42	15,24	17,23
KGE	-0,04	0,00	0,07	0,09	-0,19	-0,27	-0,29	-0,22
Níveis (hPa)	400	500	620	700	780	850	925	1000
Estatísticas								
Correlação	0,08	0,06	0,05	0,20	0,15	0,25	0,35	0,11
RMSE (°C)	24,23	28,06	27,66	23,15	14,36	5,79	3,96	17,28
BIAS (°C)	21,26	24,84	23,97	18,05	9,72	2,39	1,24	-17,00
KGE	-0,29	-0,43	-0,63	-0,87	-0,45	0,13	0,34	-0,50

Observou-se que, tomando-se os valores de Td mínimo, não houve aproximação significativa das medidas do MODIS em relação às sondagens. Então, foram propostas duas normalizações aos valores de PW.

A primeira normalização foi concebida segundo a expressão

$$XPW = \frac{(PW - PW_{\min})}{(PW_{\max} - PW_{\min})} \quad (4.1)$$

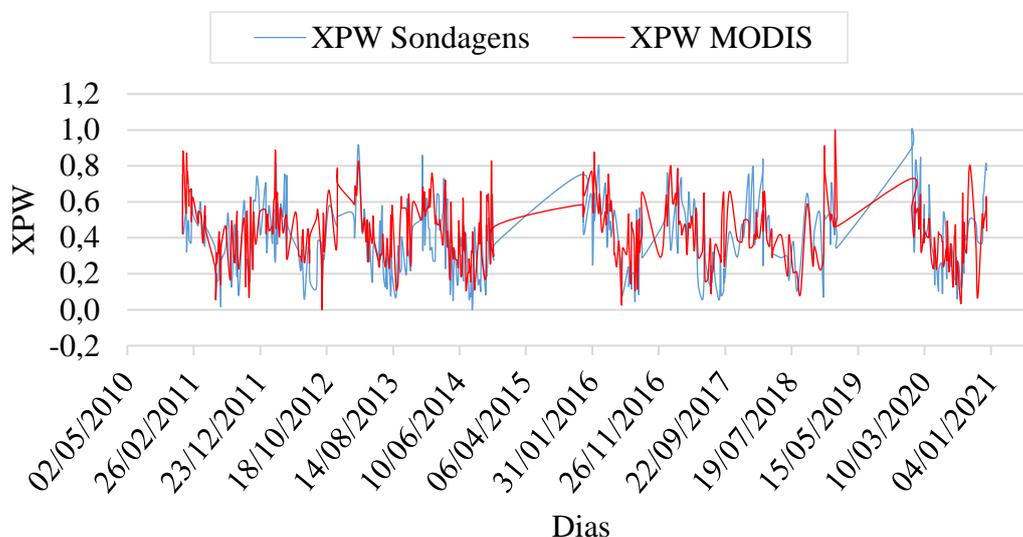
onde: PW é calculado com os valores de Td médio do MODIS e Td das sondagens, PW<sub>mín</sub> é o valor mínimo das séries, e PW<sub>máx</sub> é o valor máximo.

A segunda normalização foi obtida pela expressão

$$NPW = \frac{(PW - \mu)}{\sigma} \quad (4.2)$$

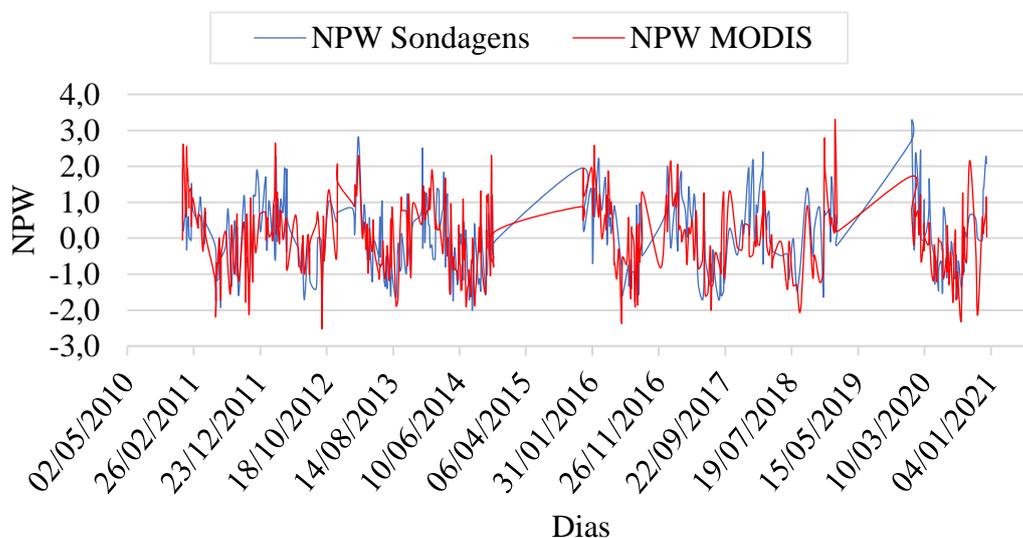
onde: PW é calculado com os valores de Td médio do MODIS e Td das sondagens,  $\mu$  é média da série, e  $\sigma$  é o desvio padrão.

A Figura 4.4 mostra os resultados da primeira normalização. É possível notar que, após a normalização, o afastamento entre os dados anteriormente apontado foi eliminado.



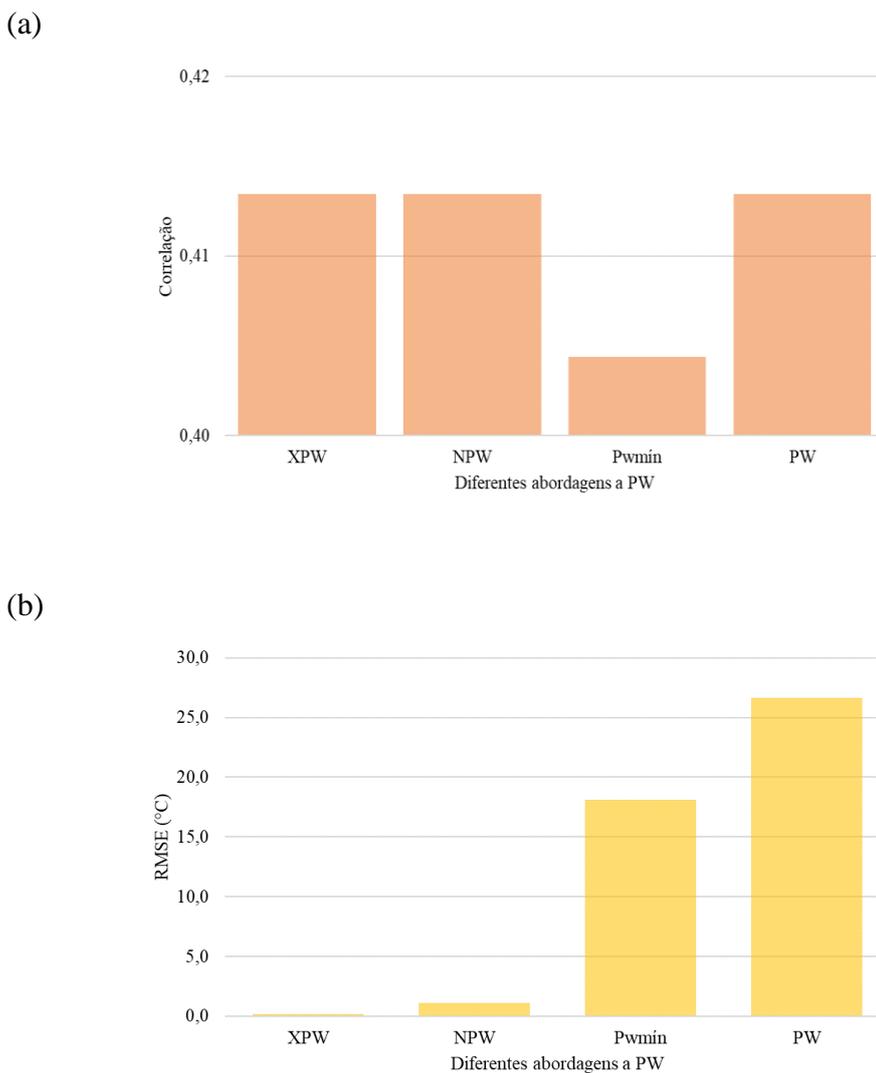
**Figura 4.4** - PW calculada com informações das sondagens do Galeão (azul) e PW MODIS (vermelho) normalizada pela Equação 4.1.

A Figura 4.5 mostra os resultados da segunda normalização. A segunda normalização atuou sobre os dados analogamente à primeira, aproximando os resultados.



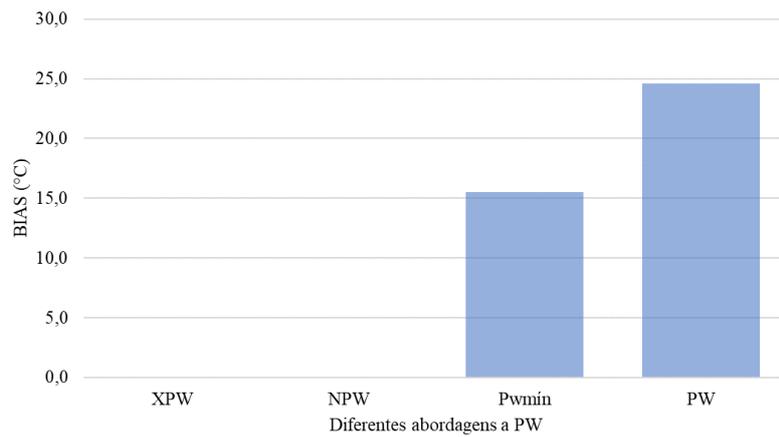
**Figura 4.5** - PW calculada com informações das sondagens do Galeão (azul) e PW MODIS (vermelho) normalizada pela Equação 4.2.

Na Figura 4.6, apresentam-se os valores da correlação (a), RMSE (b), BIAS (c) e KGE (d) calculados entre PW<sub>mín</sub>, XPW, NPW do MODIS e das sondagens. Após as normalizações com T<sub>d</sub> médio e cálculo de PW com T<sub>d</sub> mínimo, a correlação não mostrou mudança significativa quando comparada aos primeiros resultados (Figura 4.6a). Entretanto o RMSE (Figura 4.6b) e o BIAS (Figura 4.6c) foram reduzidos especialmente após as normalizações. O coeficiente KGE (Figura 4.6d) mostrou melhor concordância com a normalização XPW. A Tabela 4.4 apresenta o resumo desses resultados.

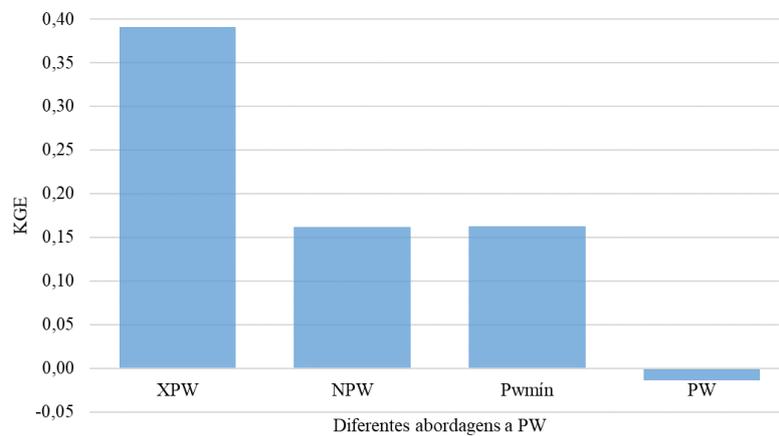


**Figura 4.6** – Resultados estatísticos das diferentes abordagens para estimativa de PW: (a) correlação, (b) RMSE, (c) BIAS e (d) KGE.

(c)



(d)



**Figura 4.6** – Continuação.

**Tabela 4.4** – PW calculado com Td, valor mínimo e normalizações de PW calculado com Td médio.

Estatísticas	Pwmin	XPW	NPW	PW
Correlação	0,40	0,41	0,41	0,41
RMSE (°C)	18,13	0,20	1,08	26,65
BIAS (°C)	15,49	0,05	0,00	24,60
KGE	0,16	0,39	0,16	-0,01

#### 4.2.2. Investigando PW máximo, médio e mínimo

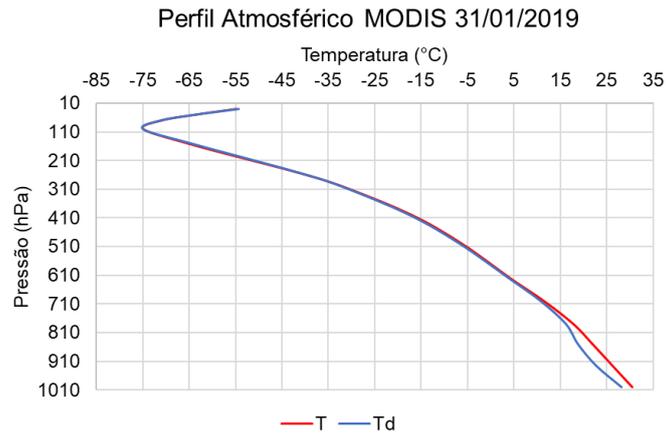
Devido às diferenças encontradas entre os valores, especialmente, de Td do MODIS e Td das radiossondagens, foi proposta uma investigação mais aprofundada do produto do MODIS utilizando os valores de PW máximo, médio e mínimo de todo o período analisado. Os dias com os valores de PW máximo, médio e mínimo estão descritos na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5** – Dias com valores de PW máximo, médio e mínimo de 2011 - 2020 a partir das sondagens do Galeão.

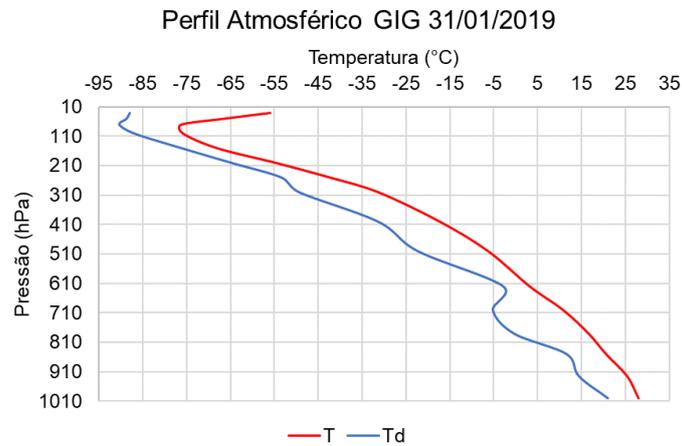
PW MÁXIMO	31/01/2019
PW MÉDIO	21/04/2011
PW MÍNIMO	27/09/2012

Foram configurados gráficos com os perfis atmosféricos segundo o MODIS (valores médios e mínimos) e as radiossondagens nos dias mencionados na Tabela 4.5. A Figura 4.7 mostra os resultados para o dia de PW máximo (31/01/2019). Observa-se que, na Figura 4.7a, o perfil atmosférico pelo MODIS encontra-se altamente úmido (T muito próximo a Td) com um ligeiro distanciamento das variáveis nos níveis próximos a superfície. Na Figura 4.7b, o perfil pela sondagem mostra a alta umidade calculada, todavia é notório que esse perfil não se encontra tão saturado quanto àquele representado pelo MODIS. Na Figura 4.7c, o perfil pelos valores mínimos do MODIS não apresenta grande diferença do perfil com os valores médios (Figura 4.7a).

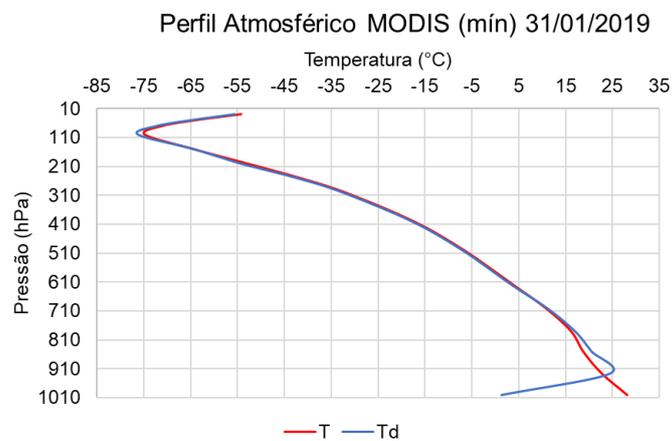
(a)



(b)



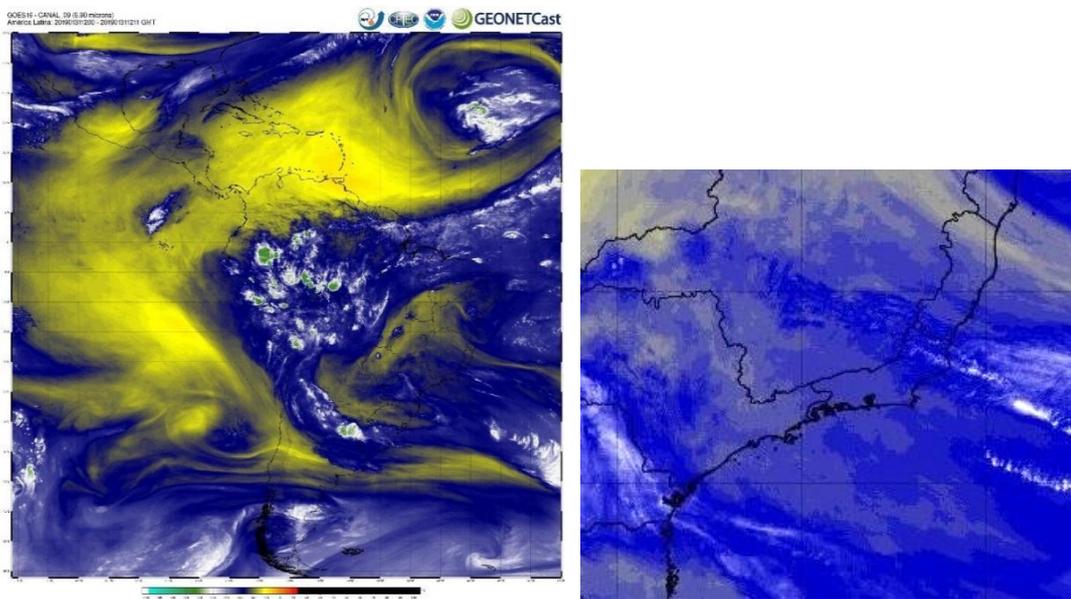
(c)



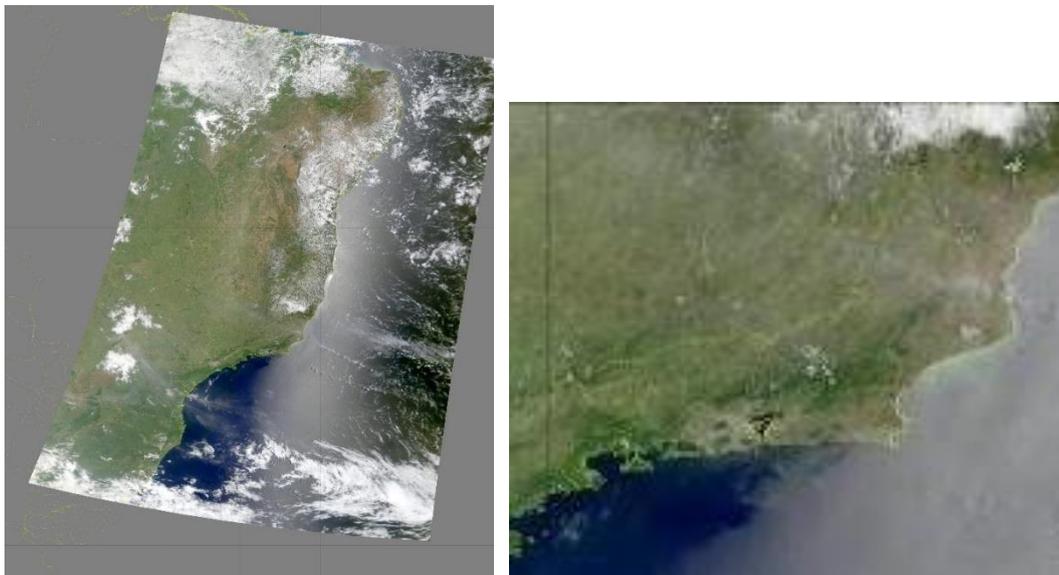
**Figura 4.7** – Perfis atmosféricos no dia de PW máximo (31/01/2019): (a) perfil atmosférico pelos valores médios do MODIS; (b) perfil atmosférico pela sondagem GIG; (c) perfil atmosférico por valores mínimos do MODIS.

As Figuras 4.8a e 4.8b mostram imagens de satélites no dia 31/01/2019 em horário próximo a sondagem e informações do MODIS. Mesmo observando-se alto valor de água precipitável, havia, nesse horário, poucas nuvens sobre a cidade do Rio de Janeiro. Segundo o METAR do dia, a nebulosidade variou entre céu limpo e poucas nuvens.

(a) GOES-16 1200 UTC



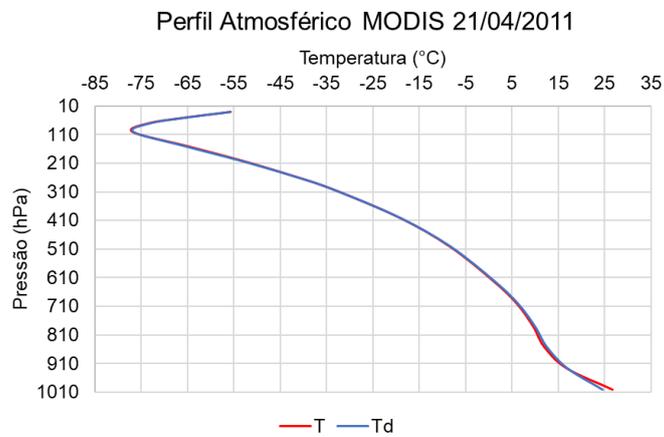
(b) TERRA 1300 UTC



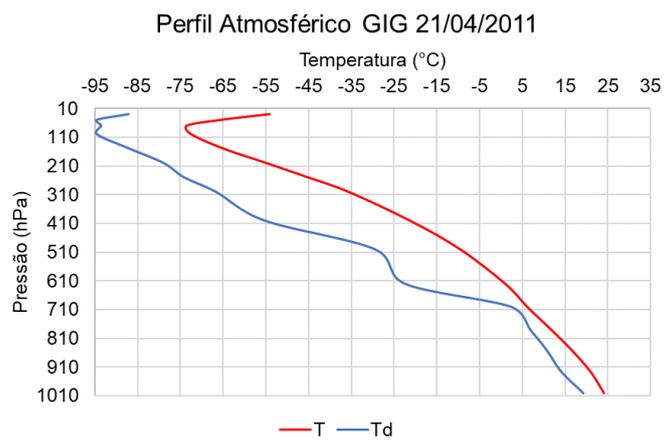
**Figura 4.8** – Imagens de satélite em 31/01/2019: (a) GOES-16 às 1200 UTC; (b) TERRA às 1300 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.

No dia de PW médio, 21/04/2011, de forma similar ao que foi encontrado para o dia de PW máximo, o perfil atmosférico apresentado pelo MODIS (Figura 4.9a) também se encontra muito mais úmido do que o visto pela sondagem (Figura 4.9b). O mesmo fato ocorre para o produto MODIS com valores mínimos (Figura 4.9c).

(a)

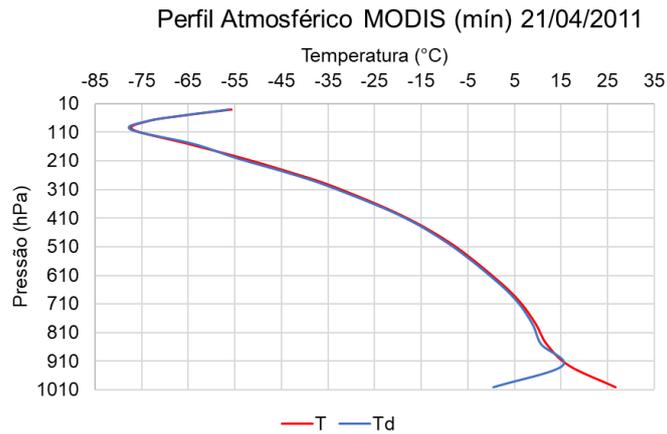


(b)



**Figura 4.9** – Perfis atmosféricos no dia de PW médio (21/04/2011): (a) perfil atmosférico pelos valores médios do MODIS; (b) perfil atmosférico pela sondagem GIG; (c) perfil atmosférico por valores mínimos do MODIS.

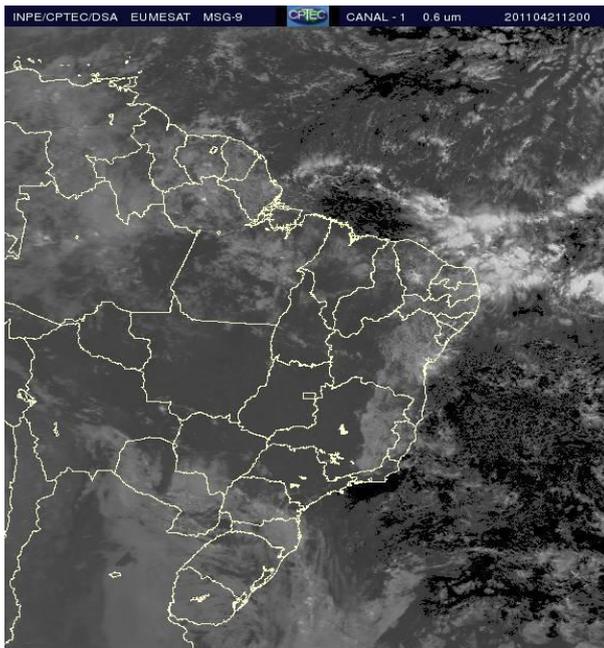
(c)



**Figura 4.9** – Continuação.

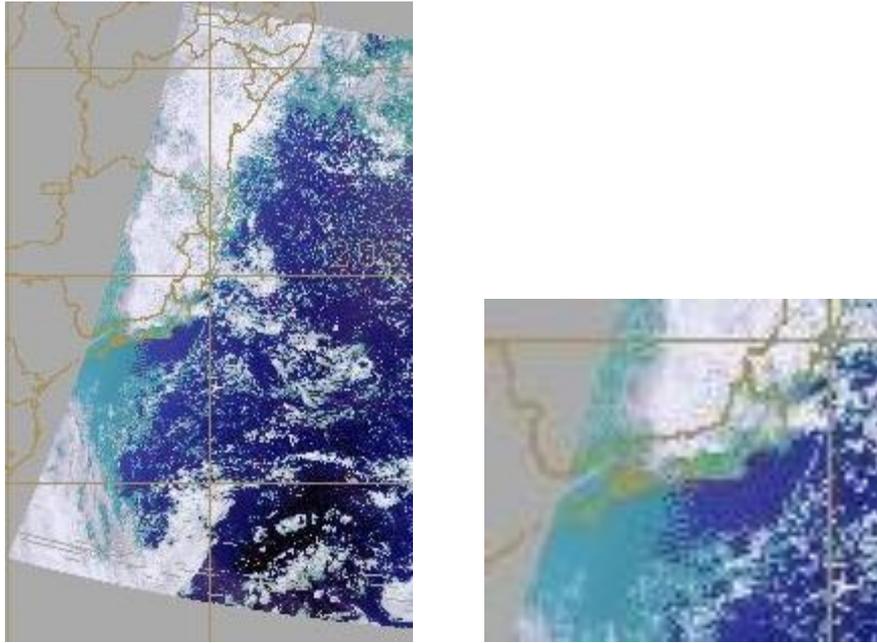
Como mostram as imagens de satélites na Figura 4.10, no horário analisado, havia pouca ocorrência de nuvens, o que sugere não ser o problema para a divergência entre MODIS e sondagem.

(a) METEOSAT 1200 UTC



**Figura 4.10** – Imagens de satélite em 21/04/2011: (a) METEOSAT às 1200 UTC; (b) TERRA às 1228 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.

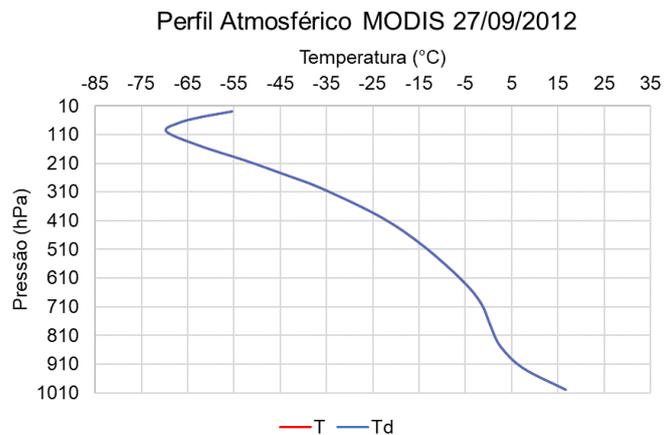
(b) TERRA 1228 UTC



**Figura 4.10** – Continuação.

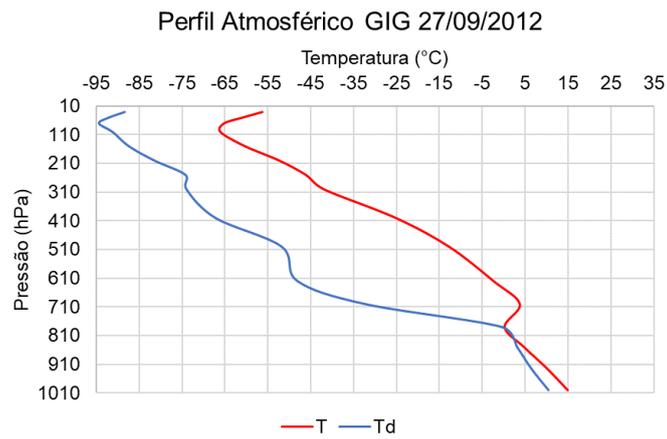
Os gráficos da Figura 4.11 mostram os resultados para o dia de menor PW dos 10 anos analisados. É possível observar um padrão de temperatura do ponto de orvalho muito elevado do MODIS em relação à sondagem. As imagens de satélites na Figura 4.12 mostram a presença de algumas nuvens sobre a região. Contudo, pelas análises anteriores, fica claro que a presença de nuvens não é fator determinante das diferenças.

(a)



**Figura 4.11** – Perfis atmosféricos no dia de PW mínimo (27/09/2012): (a) perfil atmosférico pelos valores médios do MODIS; (b) perfil atmosférico pela sondagem GIG; (c) perfil atmosférico por valores mínimos do MODIS.

(b)



(c)

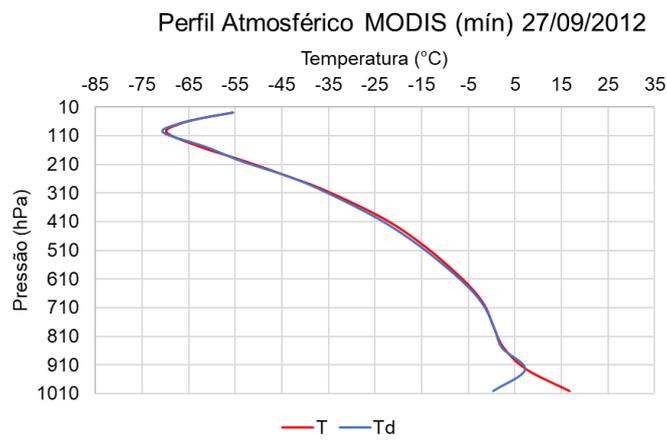
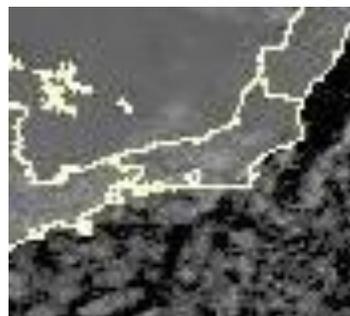
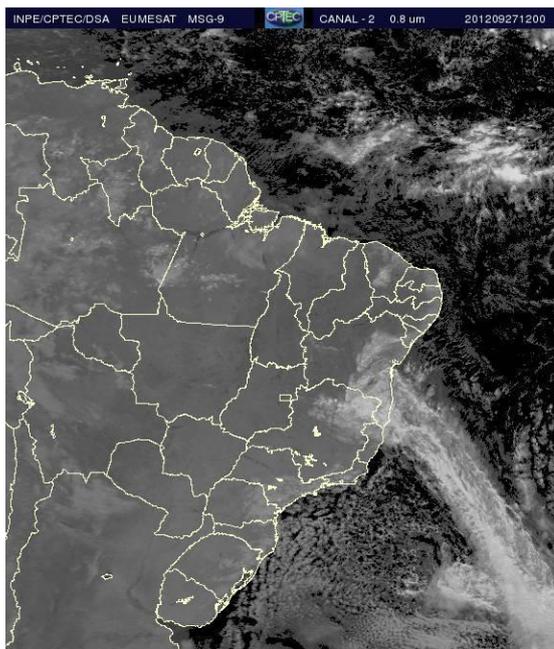
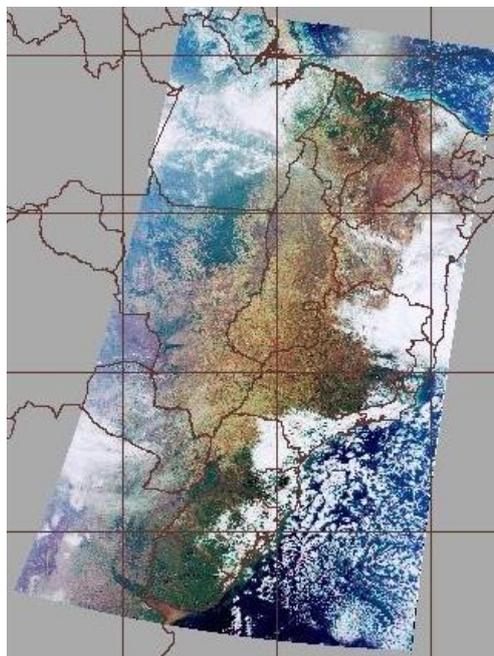


Figura 4.11 – Continuação.

(a) METEOSAT 1200 UTC



(b) TERRA 1228 UTC



**Figura 4.12** – Imagens de satélite em 27/09/2012: (a) METEOSAT às 1200 UTC; (b) TERRA às 1228 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.

### 4.3. Análises nas nove regiões

Tendo em vista os resultados encontrados na sessão anterior, fez-se necessário continuar a investigação sobre os motivos das divergências entre MODIS e radiossondagem nos valores de Td e, conseqüentemente, em termos de PW.

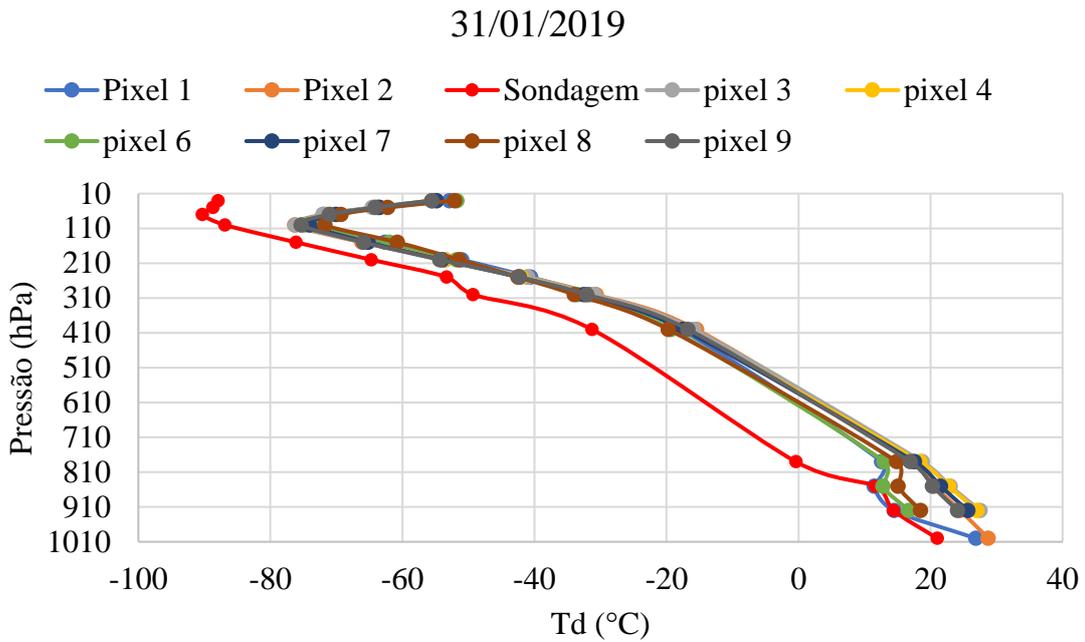
Assim, foram obtidas, separadamente, informações de PW dos nove (9) píxeis que dividem a região de estudo com o intuito de averiguar se as áreas de cada píxel diferem por muito ou pouco umas das outras. A Figura 4.13 mostra a divisão dos píxeis por número.



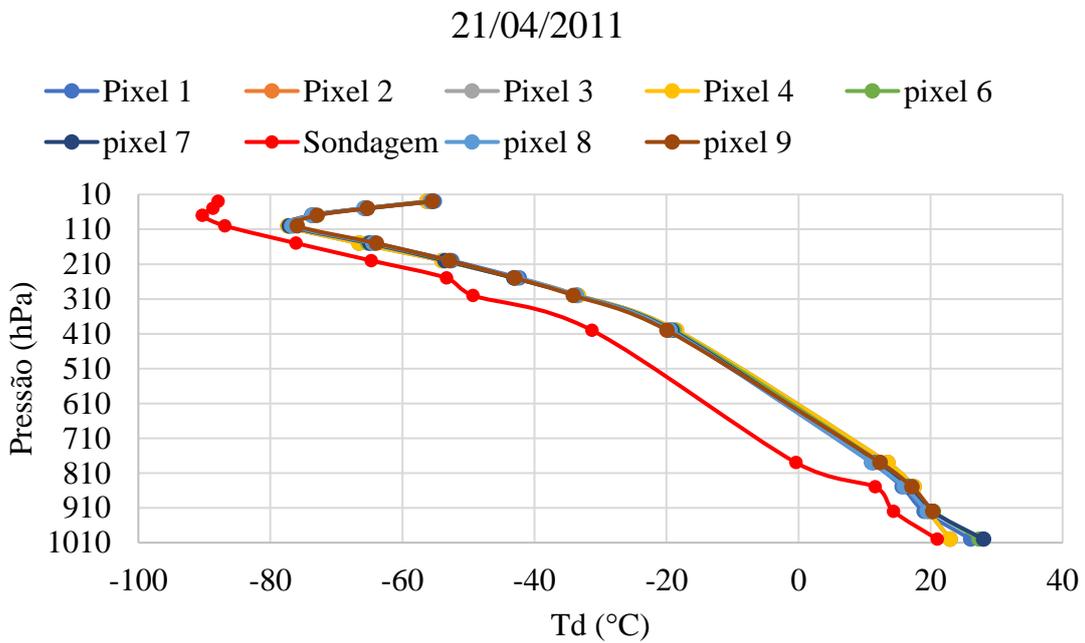
**Figura 4.13** – Posição dos 9 (nove) píxeis de extração das informações do MODIS.

Os gráficos da Figura 4.14 mostram os resultados de PW máximo, médio e mínimo respectivamente para as 9 áreas e os valores das sondagens. O píxel de número 5 esteve sem informações nos 3 dias. No dia 27/09/2012, apenas o píxel 9 apresentou informações válidas. Observando os três gráficos, é possível notar certas diferenças nos níveis mais baixos da atmosfera. A partir do dia 710 hPa, as oito (8) áreas apresentam pouquíssima diferença nos valores de PW. Esses resultados sugerem que as divergências encontradas em Td não provêm dos diferentes píxeis.

(a)

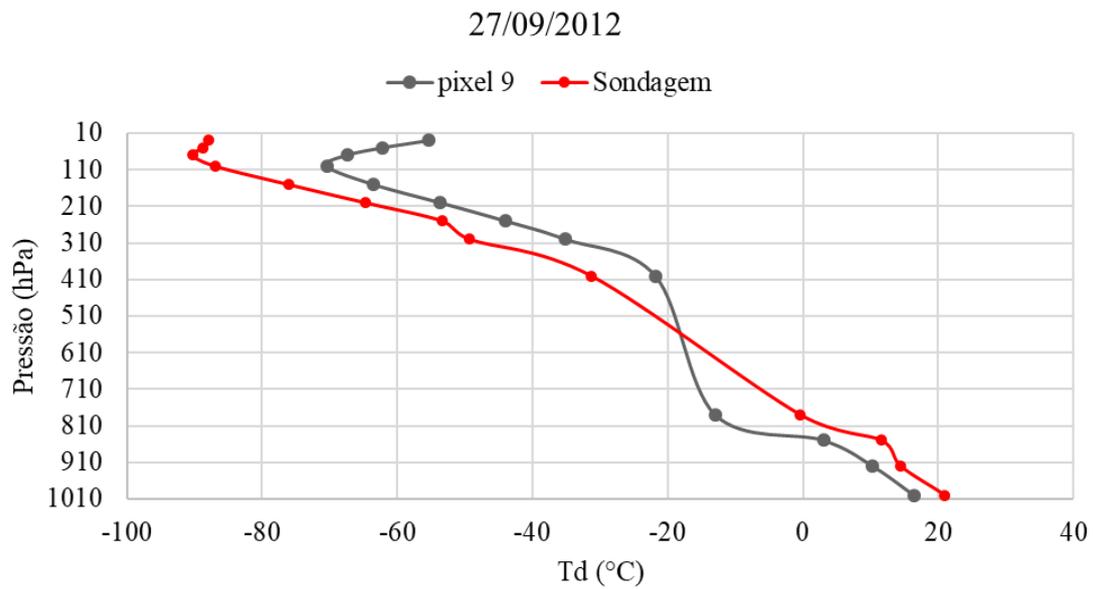


(b)



**Figura 4.14** – Informações dos perfis atmosféricos pelo MODIS nas nove (9) diferentes regiões (cores) em contraste com os perfis atmosféricos da sondagem GIG (vermelho) coletados em (a) 31/01/2019, (b) 21/04/2011 e (c) 27/09/2012.

(c)



**Figura 4.14** – Continuação.

#### 4.4. Comparações MODIS e Reanálise

Após as diversas análises feitas sobre o produto do MODIS em comparação a radiossondagens, conforme previsto na metodologia proposta, foram feitas análises similares acrescentando as informações da reanálise ECMWF – ERA 5. Logo, o primeiro passo foi a comparação de T e Td do MODIS em relação aos dados da reanálise. Como não foram encontradas grandes diferenças no uso dos valores médios e mínimos do produto do MODIS, nesta sessão, todos os resultados foram produzidos com valores médios. As Tabelas 4.6 (a) e 4.6 (b) trazem os resultados.

**Tabela 4.6** – Estatísticas MODIS versus reanálise: (a) temperatura do ar; (b) temperatura do ponto de orvalho.

(a)

Temperatura do ar								
Níveis (hPa)	30	50	70	100	150	200	250	300
Estatísticas								
Correlação	0,13	0,32	0,50	0,61	0,32	0,47	0,40	0,56
RMSE (°C)	2,32	2,45	3,29	2,70	2,56	1,86	2,50	2,41
BIAS (°C)	0,88	0,12	0,51	-0,64	0,28	0,42	0,20	-0,15
KGE	0,00	0,19	0,41	0,61	0,22	0,40	0,38	0,55
Níveis (hPa)	400	500	620	700	780	850	925	1000
Estatísticas								
Correlação	0,65	0,66	0,69	0,68	0,80	0,82	0,83	0,87
RMSE (°C)	2,12	2,00	1,68	2,28	2,56	4,20	3,59	1,96
BIAS (°C)	-0,35	-0,63	0,28	-1,42	-1,89	-3,70	-3,01	-0,70
KGE	0,65	0,65	0,57	0,63	0,74	0,69	0,76	0,79

**Tabela 4.6** – Continuação.

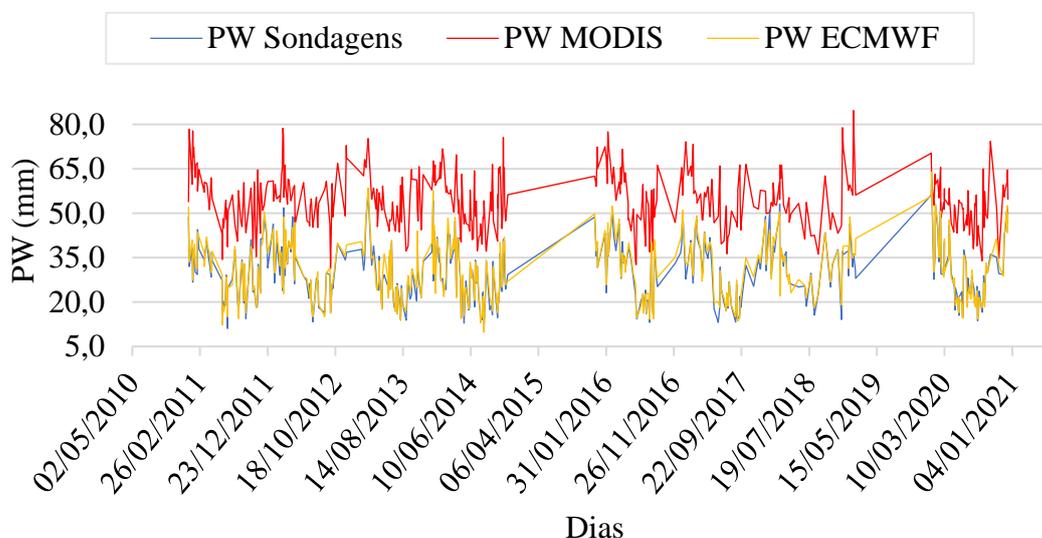
(b)

Temperatura do ponto de orvalho								
Níveis (hPa)	30	50	70	100	150	200	250	300
Estatísticas								
Correlação	-0,03	-0,09	0,13	0,16	-0,12	0,50	-0,03	0,07
RMSE (°C)	34,80	23,08	14,10	7,98	8,89	9,84	12,30	15,24
BIAS (°C)	34,79	23,03	13,85	7,37	8,23	8,41	9,88	12,77
KGE	-0,15	-0,18	0,08	0,16	-0,18	-0,03	-0,05	0,07
Níveis (hPa)	400	500	620	700	780	850	925	1000
Estatísticas								
Correlação	0,16	0,11	0,09	0,22	0,21	0,23	0,42	0,58
RMSE (°C)	20,68	26,01	27,35	20,94	12,87	6,80	4,38	5,34
BIAS (°C)	18,20	23,41	24,20	17,00	9,89	4,27	1,98	4,63
KGE	0,16	0,11	0,04	0,20	0,20	0,19	0,39	0,55

De forma semelhante aos resultados para radiossondagem vistos na sessão 4.1, é possível notar que os valores de T do produto do MODIS se aproximam mais dos valores da reanálise ECMWF se comparados aos valores de Td. O máximo RMSE observado para T é 4,20°C também em 850 hPa, enquanto, para Td, o valor é 31,8°C no nível de 30 hPa. O máximo BIAS para T é -3,7°C em 850 hPa, o que significa que, nesse nível, os valores do MODIS são inferiores aos valores da reanálise. O máximo BIAS de Td é 34,79°C em 30 hPa, ou seja, nesse nível, os valores do MODIS superestimam os valores da reanálise ECMWF. Novamente, é possível perceber que, ao se tratar do BIAS, em todos os níveis, o MODIS apresenta valores mais altos, enquanto, para T, não existe um viés bem definido. Quanto à KGE, nota-se boa concordância entre as duas fontes, especialmente em níveis mais próximos à superfície para ambos, T e Td, com destaque para a ótima concordância entre as temperaturas do ar a partir de 400 hPa até a superfície.

#### 4.5. Curvas de PW MODIS, Sondagens e Reanálise

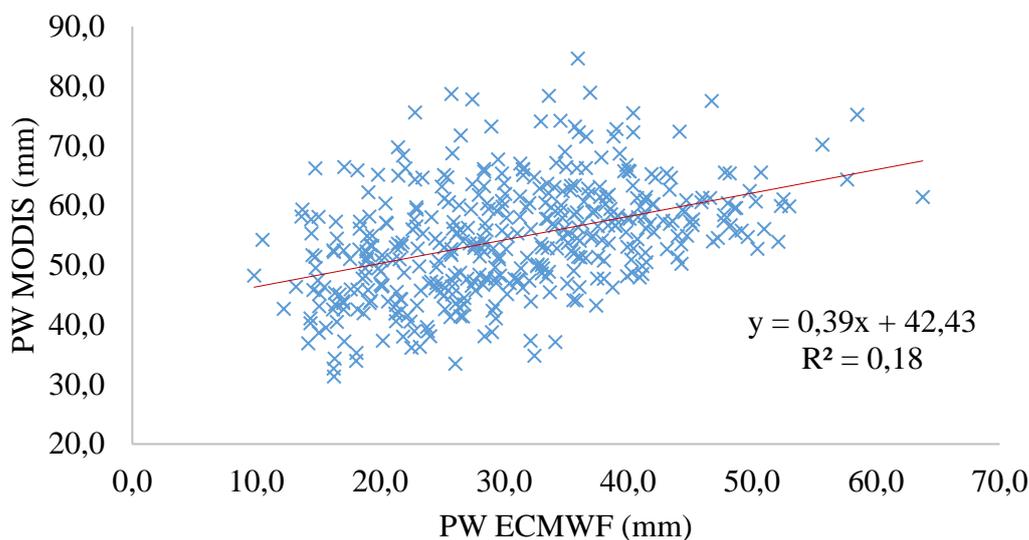
Assim como realizado para os dados MODIS e sondagens, foi calculada a água precipitável total com as informações da reanálise e comparadas no gráfico da Figura 4.15 conjuntamente com os resultados anteriores.



**Figura 4.15** – PW (mm) calculada com informações das sondagens do Galeão (azul), do MODIS (vermelho) e do ECMWF (amarelo).

É possível observar novamente, na Figura 4.15, certo distanciamento dos resultados do MODIS em relação à reanálise. O fato da reanálise utilizar saídas de modelos que são alimentados por dados coletados de superfície, incluindo radiossondagens, pode explicar tal resultado.

A Figura 4.16 traz a dispersão entre PW mensurado com MODIS e estimado com reanálise do modelo ECMWF, configuração que se assimila à dispersão disposta na Figura 4.2, visto que as informações ECMWF têm valores muito próximos àqueles das radiossondagens.



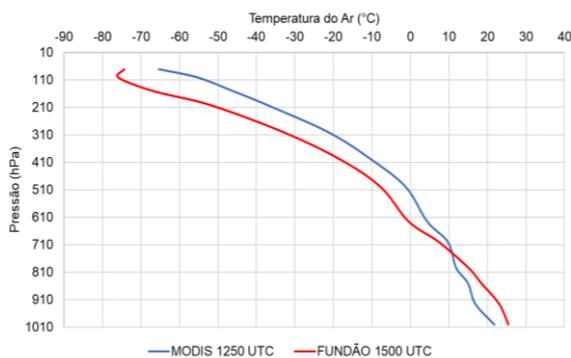
**Figura 4.16** – Dispersão de PW MODIS (mm) versus PW ECMWF (mm).

#### **4.6. MODIS versus sondagens Fundão**

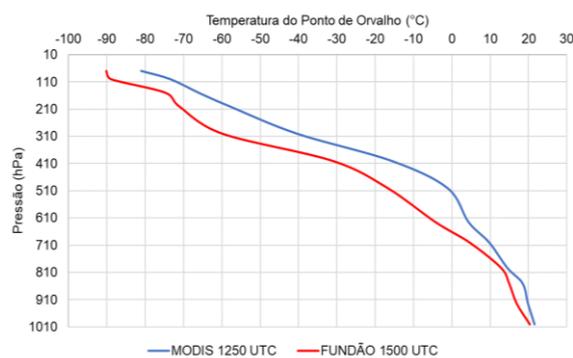
As radiossondagens lançadas sobre a Ilha do Fundão de 2016 a 2018 (Silva, 2019) também foram resgatadas e comparadas, quando possível, com as informações MOD07. Foram feitas, também, as comparações com radiossondagens lançadas no Aeroporto Galeão nos mesmos dias.

Na Figura 4.17a, são apresentados os resultados para temperatura do ar, enquanto, na Figura 4.17b, são dispostos os valores de temperatura do ponto de orvalho sobre o Fundão no dia 17/11/2016. É possível notar que ambas as temperaturas estimadas pelo MODIS apresentam comportamento similar às temperaturas obtidas pela radiossonda em relação à altitude. Também é possível observar que as temperaturas estimadas pelo MODIS são maiores do que as temperaturas da radiossondagem, com exceção à temperatura do ar nos primeiros níveis atmosféricos. Entretanto deve-se levar em conta a diferença de horário na obtenção dos dados. Existe uma diferença de 2h10min entre as fontes de dados, o que pode justificar as desconformidades. A correlação e a medida RMSE obtidas para T entre as diferentes fontes foi de 0,980 e 10,18°C, respectivamente, enquanto, para Td, foi de 0,994 e 10,28°C.

(a) Temperatura ar FUNDÃO 17/11/2016



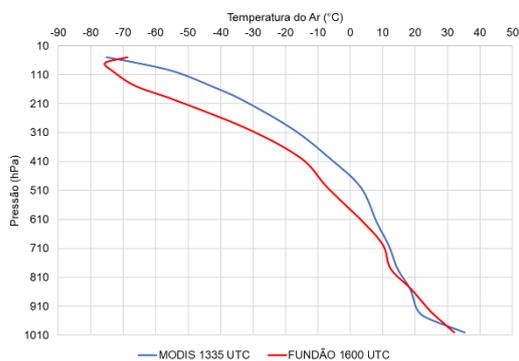
(b) Td FUNDÃO 17/11/2016



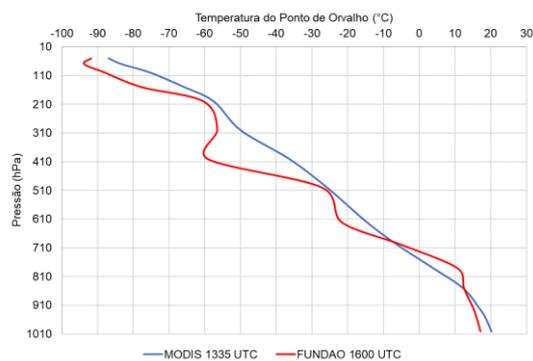
**Figura 4.17** – Perfil atmosférico em 17/11/2016 sobre o Fundão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).

A comparação entre as temperaturas do ar e do ponto de orvalho sobre o Fundão no dia 13/02/2017 estão apresentadas na Figura 4.18a e Figura 4.18b. Nota-se que, apesar dos valores de T serem bem próximos por ambas as fontes, a Td obtida pela radiossondagem oscilou diversas vezes conforme a altura aumentava, levando a correlação a diminuir. A correlação e a métrica RMSE obtidas para T entre as diferentes fontes foi de 0,993 e 5,57°C, enquanto, para Td, foi de 0,991 e 8,40°C, respectivamente.

(a) Temperatura ar FUNDÃO 13/02/2017



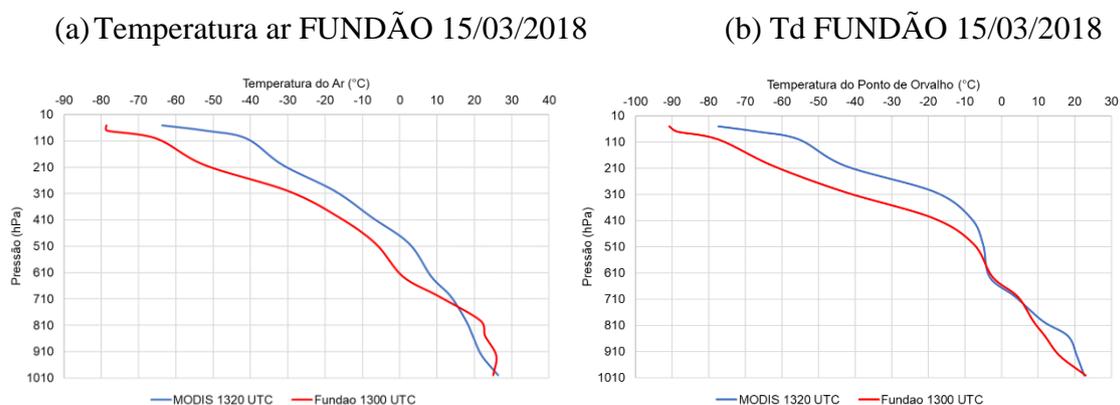
(b) Td FUNDÃO 13/02/2017



**Figura 4.18** – Perfil atmosférico em 13/02/2017 sobre o Fundão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).

Na Figura 4.19a, no dia 15/03/2018, observa-se que, próximo à superfície, a temperatura do ar estimada pelo MODIS é maior que aquela medida pela radiossondagem. Todavia, conforme a altura aumenta, a T pelo MODIS reduz-se, sendo inferior ao valor da radiossondagem até 750 hPa. Após esse nível, o perfil estimado pelo

MODIS apresenta temperaturas maiores do que a radiossondagem. Analisando a Td (Figura 4.19b), nota-se que os valores começam bem próximos junto a superfície, afastam-se logo em seguida e aproximam-se novamente em 710 hPa. Em 650 hPa, as Tds voltam a se afastar. A correlação e o valor de RMSE obtidos, nesse dia, para T entre as diferentes fontes foi de 0,973 e 12,79°C, enquanto, para Td, foi de 0,985 e 12,48°C, respectivamente.

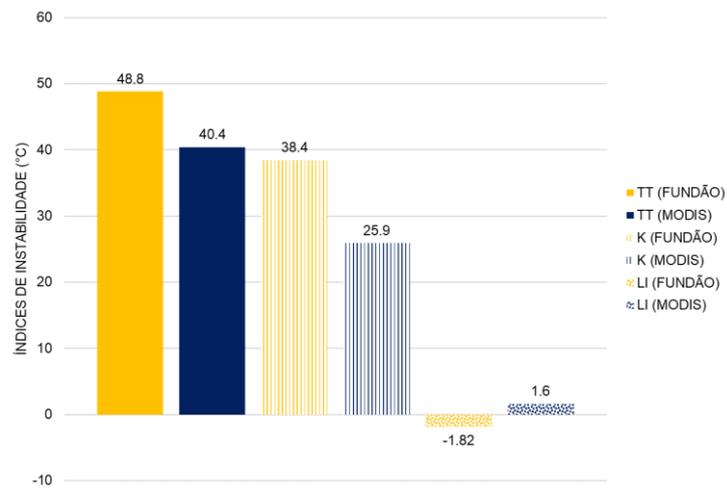


**Figura 4.19** – Perfil atmosférico em 15/03/2018 sobre o Fundão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).

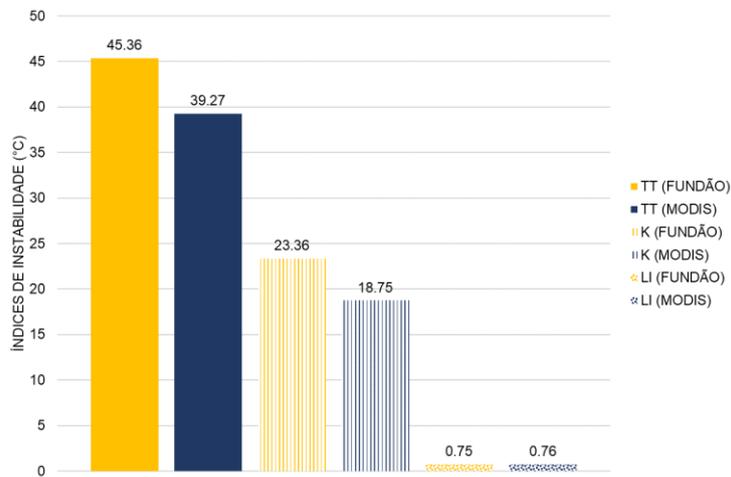
#### 4.6.1. Comparação entre os índices TT, K e LI obtidos pela radiossondagem e pelo produto do MODIS sobre a Ilha do Fundão

Seguindo os critérios para classificação de instabilidade de Nascimento (2005) (Tabela 3.4), no dia 17/11/2016, sobre o Fundão (Figura 4.21a), a radiossondagem alertou sobre a presença de instabilidade com todos os três índices propostos, enquanto apenas o índice TT estimado pelo MODIS alertou instabilidade. O mesmo comportamento ocorre no dia 13/02/2017 (Figura 4.20b). Já no dia 15/03/2018 (Figura 4.20c), todos os índices estimados pela radiossondagem e pelo MODIS mostram instabilidade, exceto o índice K estimado pelo MODIS.

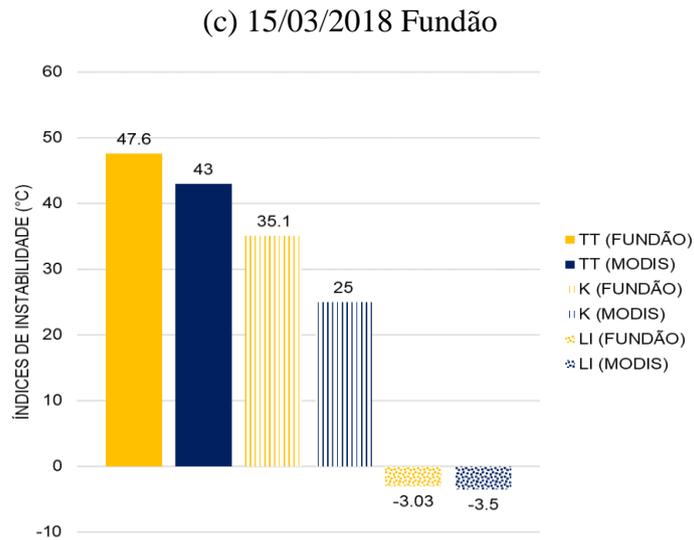
(a) 17/11/2016 Fundão



(b) 13/02/2017 Fundão



**Figura 4.20** – Valores dos índices de instabilidade TT, K e LI sobre o Fundão obtidos pela radiossondagem (amarelo) e obtidos pelo produto do MODIS (azul) em: (a) 17/11/2016; (b) 13/02/2017; (c) 15/03/2018.



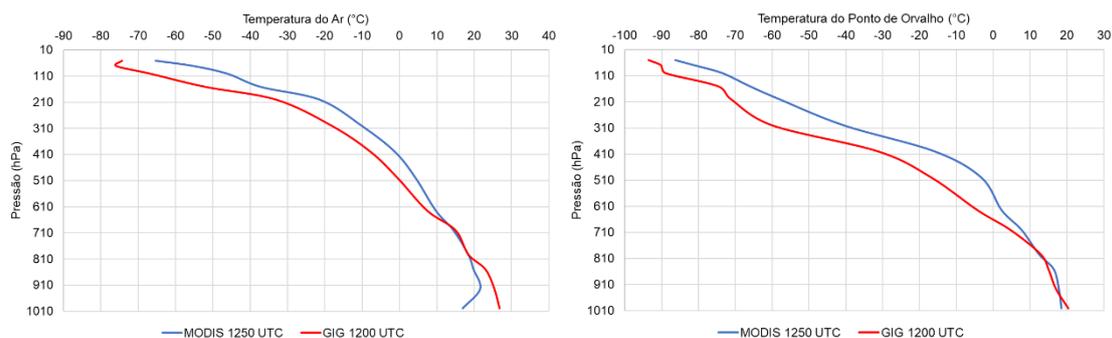
**Figura 4.20** – Continuação.

#### 4.7. Comparação entre radiossondagens sobre o Galeão e o produto do MODIS

A Figura 4.21 (a) e (b) apresenta, respectivamente, os perfis de temperatura do ar e de temperatura do ponto de orvalho sobre o Galeão. Na Figura 4.21a, observa-se que, próximo à superfície, até o nível de 810 hPa, o produto do MODIS detecta temperaturas inferiores àquelas observadas pela radiossondagem. Porém, após o nível de 750 hPa a T estimada pelo MODIS supera àquela observada na radiossondagem. Com relação à Td (Figura 4.21b), os perfis mostram-se muito próximos desde a superfície até 750 hPa, afastando-se após esse nível. A correlação e a medida RMSE entre T da radiossondagem e do MODIS, nesse dia, foi de 0,979 e 10,31°C, respectivamente, enquanto a correlação entre Tds foi de 0,993 e 9,91°C, respectivamente.

(a) Temperatura ar GALEÃO 17/11/2016

(b) Td GALEÃO 17/11/2016

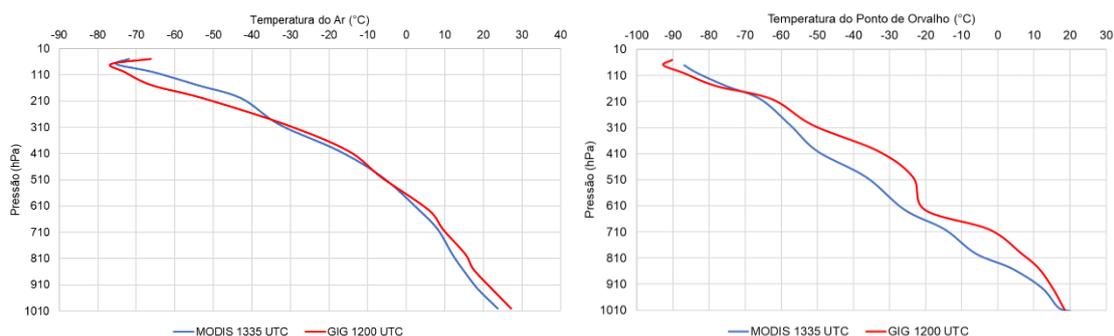


**Figura 4.21** – Perfil atmosférico em 17/11/2016 sobre o Galeão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).

A Figura 4.22 apresenta os campos de temperatura do ar e do ponto de orvalho sobre o Galeão no dia 13/02/2017. Nesse dia e horário, a T, pelas diferentes fontes, apresenta diferença de poucos graus ao longo de toda a camada atmosférica. No entanto, a Td apresenta maiores diferenças, havendo também significativa oscilação no perfil traçado pela radiossondagem. Nesse dia, a correlação e a medida RMSE entre a T da radiossondagem e a T do MODIS foi de 0,992 e 5,31°C, respectivamente, enquanto, entre as Tds, foi de 0,995 e 5,76°C, respectivamente.

(a) Temperatura ar GALEÃO 13/02/2017

(b) Td GALEÃO 13/02/2017

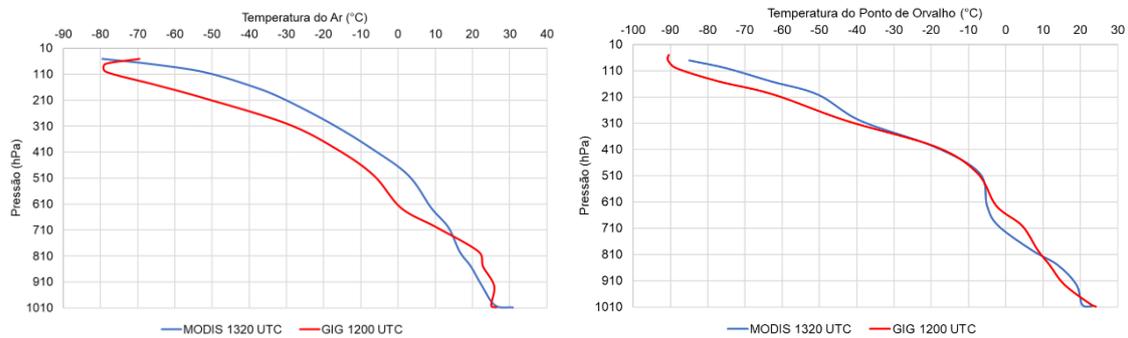


**Figura 4.22** – Perfil atmosférico em 13/02/2017 em sobre o Galeão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).

No dia 15/03/2018, como apresentado na Figura 4.23a, a T estimada pelo MODIS é maior do que aquela observada pela radiossondagem na região próxima à superfície. Acima de 1010 hPa, essa relação inverte-se e mantém-se até 710 hPa, quando a T pelo MODIS volta a ser superior àquela da radiossondagem. Com relação a Td (Figura 4.23b), observa-se que ambas as fontes mostram valores muito próximos e um padrão de

oscilação com a altitude. A correlação e a medida RMSE entre T da radiossondagem e do MODIS foi de 0,970 e 12,77°C, respectivamente, enquanto a correlação entre Td foi de 0,984 e 14,21°C, respectivamente.

(a) Temperatura ar GALEÃO 15/03/2018      (b) Td GALEÃO 15/03/2018

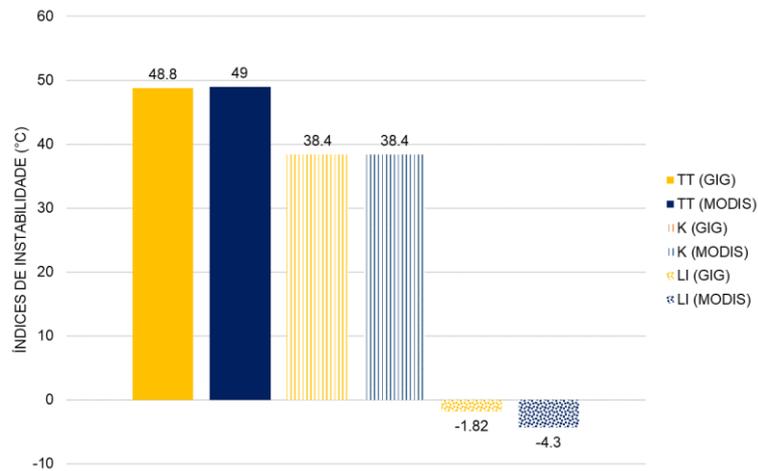


**Figura 4.23** – Perfil atmosférico em 15/03/2018 sobre o Galeão por radiossondagem e pelo produto MODIS: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).

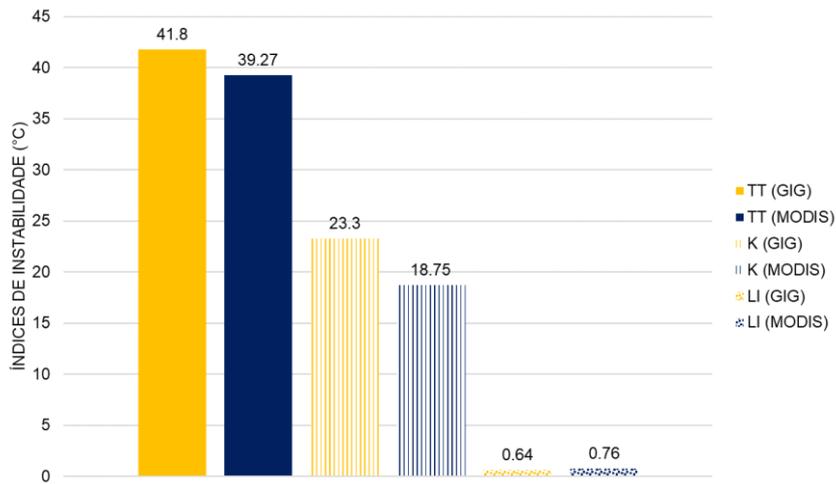
#### 4.7.1. Comparação entre os índices TT, K e LI obtidos pela radiossondagem e pelo produto do MODIS sobre o Galeão

Quanto ao tratamento dos índices de instabilidade calculados sobre o Galeão, no dia 17/11/2016 (Figura 4.24a), ambos, MODIS e radiossondagem, identificaram instabilidade atmosférica nesse dia. No dia 13/02/2018 (Figura 4.24b), novamente, as duas fontes concordam apontando instabilidade apenas por meio do índice TT. No dia 15/03/2018 (Figura 4.24c), todos os índices alertam para instabilidade, com exceção do índice K estimado pelo MODIS.

(a) 17/11/2016 Galeão

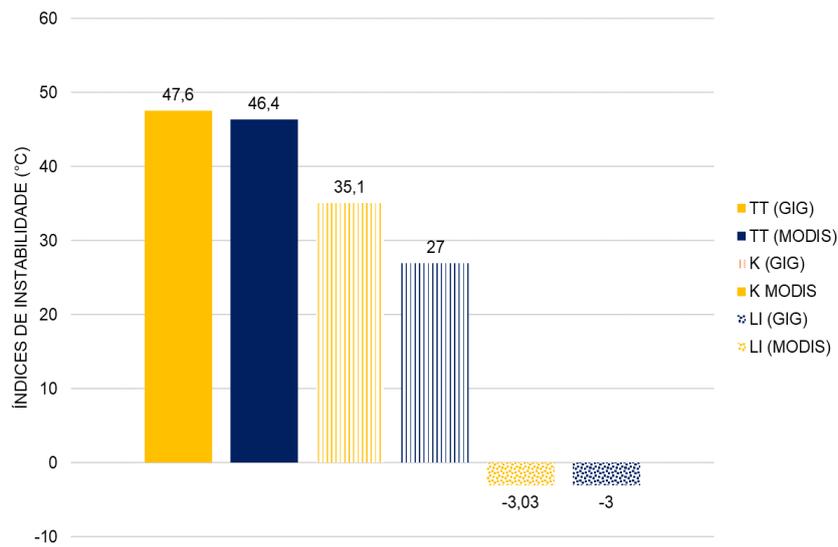


(b) 13/02/2017 Galeão



**Figura 4.24** – Valores dos índices de instabilidade TT, K e LI sobre o Galeão obtidos pela radiossondagem (amarelo) e obtidos pelo produto do MODIS (azul) em: (a) 17/11/2016; (b) 13/02/2017 e (c) 15/03/2018.

(c) 15/03/2018 Galeão



**Figura 4.24** – Continuação.

Na Tabela 4.7, é apresentada uma síntese da análise dos resultados obtidos na comparação entre as temperaturas provenientes das radiossondagens e do MODIS. Na Tabela 4.8 estão dispostos os valores da tabela de contingência proposta no Capítulo 3 para a comparação dos índices de instabilidade, bem como o resultado dos índices dicotômicos AC, SR, POD e FAR. Observa-se que, nos dias analisados, os valores dos índices de instabilidade estimados pelo MODIS não apresentaram qualquer falso alarme, fazendo com que o valor do FAR seja nulo. Entretanto, houve diversos dias nos quais os índices pelo MODIS não alertaram para instabilidade, enquanto aqueles provenientes das radiossondagens identificaram instabilidade presente na atmosfera.

**Tabela 4.7** – Síntese dos resultados obtidos para T e Td entre as radiossondagens e o produto do MODIS.

Local	Dia/Mês/Ano	Correlação T	Correlação Td	RMSE T (°C)	RMSE Td (°C)
Fundão	17/11/2016	0,980	0,994	10,18	10,28
Galeão	17/11/2016	0,979	0,993	10,31	9,91
Fundão	13/02/2017	0,993	0,991	5,57	8,40
Galeão	13/02/2017	0,992	0,995	5,31	5,76
Fundão	15/03/2018	0,973	0,985	12,79	12,48
Galeão	15/03/2018	0,970	0,984	12,77	14,21
Galeão	25/04/2011	0,991	0,988	8,42	9,35

**Tabela 4.8** – Síntese dos resultados obtidos para os índices TT, K e LI.

	TT	K	LI
a	6	1	3
b	1	4	2
c	0	0	0
d	0	2	2
AC	0,86	0,50	0,71
SR	0,86	0,20	0,60
POD	1,00	0,25	1,00
FAR	0	0,67	0,50

A síntese apresentada ilustra o potencial de uso de dados do satélite MODIS no monitoramento das condições atmosféricas. A partir desse referencial, investigam-se, no próximo capítulo, dois eventos extremos de chuva que ocorreram na cidade do Rio de Janeiro no que tange ao potencial uso de dados de radiossondagem por satélite. Dessa forma, espera-se que atenção especial seja direcionada para o potencial de emprego desse tipo de informação na área de hidrometeorologia e de meteorologia operacional.

Por outro lado, cabe, neste momento, antes de avançar para o próximo capítulo, uma maior discussão sobre as limitações do estudo, conforme se revela no próximo item.

#### **4.8. Limitações do estudo**

Ao longo da aplicação da metodologia proposta pelo trabalho, foram encontradas algumas limitações no que tange à análise comparativa de radiossondagens e de reanálises em contraste com o uso do produto do sensor MODIS do satélite de órbita polar TERRA sobre a cidade do Rio de Janeiro. Complementarmente, observaram-se características positivas e limitantes dos dados do MODIS. Cabe salientar ainda que os dados MODIS, como apontado no presente estudo, podem vir a complementar o conjunto de medições usualmente empregadas em meteorologia para monitoramento das condições atmosféricas atuais bem como na realização de estudos climatológicos locais e regionais.

Nesse sentido, a presente sessão busca trazer à luz algumas das premissas empregadas no trabalho, que oferecem ao leitor uma perspectiva mais detalhada do potencial de desdobramento desta nova linha de pesquisa, a ser retomada no capítulo final sob a forma de algumas recomendações, apontando concomitantemente limitações sobre os resultados obtidos.

Um primeiro registro que deve ser feito diz respeito ao fato de que a presença de nuvens impossibilita a leitura dos dados MODIS em dias nublados ou encobertos sobre a região, uma vez que são obtidos segundo a faixa óptica do espectro eletromagnético. Por outro lado, observe-se que, dada a larga escala de abrangência espacial do produto empregado, ao mesmo tempo que proporciona acesso à informação em escala com resolução de 5 km, é possível, que, em termos espaciais, possa se obter informações de condições atmosféricas relevantes ainda que se imponha a presença parcial de nuvens na região de estudo.

Mais ainda, sob a perspectiva temporal, é bom lembrar que o dado MODIS é captado diariamente, com duas passagens do satélite TERRA e duas passagens do satélite AQUA, perfazendo quatro observações diárias especializadas na escala do píxel, o que confere um potencial de acompanhamento das condições de estabilidade da atmosfera que se soma ao acompanhamento por meio de radiossondagens, reanálises e de monitoramento por meio de satélites geoestacionários.

Sob a perspectiva de estudos climatológicos para uma região, como foi mostrado para o acompanhamento do conteúdo de vapor da atmosfera no período 2011-2020, fica evidente o potencial do produto MODIS para monitoramento de natureza hidrometeorológico, onde se conjugam aspectos meteorológicos e hidrológicos.

Feitas essa digressão inicial sobre limitações e potencial de uso intrínsecos ao modo de obtenção do produto MODIS, é importante que, no estudo, empregaram-se as radiossondagens e as reanálises para validação das informações de satélite. Nesse ponto, observe-se que as radiossondagens são informações de natureza pontual, enquanto as reanálises são obtidas em escala espacial de 31 km, degradada em relação ao produto MODIS, com resolução espacial de 5 km.

Em particular, as radiossondas são liberadas em um dado ponto da superfície terrestre e ascendem com direções variáveis e função das correntes de ar, podendo coletar dados em estratos superiores da atmosfera que não estão associados às coordenadas geográficas de lançamento, não representando estritamente uma medição vertical do perfil atmosférico, como é o caso da medida do satélite. Assume-se, em geral, que a radiossondagem é representativa das condições atmosféricas para uma certa área de influência, que pode ser variável, conforme foi comentado na revisão bibliográfica.

Diante desses registros, observe-se que as análises comparativas conduzidas no estudo, em que foram identificadas diferenças em termos de perfilagem atmosférica, embora com muitas similitudes no que diz respeito ao comportamento, por exemplo, da temperatura do ar e da temperatura do ponto de orvalho, devem ser vistas com certa reserva e com o olhar atento que novas investigações devem ser conduzidas para melhor aprofundar essas comparações de medições feitas em escalas diferentes e de modos diferentes.

Se por um lado, no presente trabalho, o dado MODIS estava sendo submetido à validação, por outro lado, está a apontar fragilidades das bases de dados que estão a servir de referência para comparação, que também devem ser expostas. Mais que isso, observa-se que o dado MODIS pode vir a ser percebido como um conjunto de radiossondagens liberadas simultaneamente com resolução espacial de 5 km abrangendo a superfície terrestre com uma base de dados que hoje já perfaz mais de 20 anos de dados diários.

Mais do que essa virtude, a abrangência planetária do satélite inclui áreas continentais e regiões oceanográficas. Nesse sentido, o entendimento do comportamento da atmosfera em áreas não continentais, onde não se conta com radiossondagens, também pode vir a ser uma motivação para novos estudos que revelem interações entre atmosfera, oceano e continente.

Em especial, uma limitação maior constatada ao longo do desenvolvimento do estudo, que enfocou uma área costeira continental, esteve relacionada aos valores de temperatura do ponto de orvalho (Td). No trabalho foi conduzida uma breve investigação

sobre possíveis causas desta limitação, sem se chegar a um parecer elucidativo segundo os testes exploratórios realizados no trabalho. A avaliação final é de que é necessário fazer uma investigação mais aprofundada sobre a construção do algoritmo que gera o produto MODIS de perfilagem atmosférica, que, de alguma forma, foi reportado nas referências que embasam a revisão bibliográfica desta dissertação.

Repare-se que o sensor MODIS gera outros produtos, além da perfilagem atmosférica, que tem associação com temperatura de superfície e evapotranspiração, muito empregados em estudos de modelagem hidrológica e ambiental, incluindo estudo da paisagem, classificação da cobertura e uso do solo e ilhas de calor urbano, entre outros.

Diante desse cenário, pode-se antever que o melhor entendimento do mapeamento da temperatura de superfície permitirá melhor identificar as condições dos estratos atmosféricos e todas as condicionantes que geram o produto de satélite empregado na pesquisa. Assim, incentiva-se que novos trabalhos procurem avançar especialmente nesse segmento, de forma que novos aperfeiçoamentos científico-tecnológicos possam ser feitos.

## **Capítulo 5 – Estudo de Caso de Chuva Intensa com Radiossondagem**

No presente capítulo, são apresentados dois estudos de caso de chuva intensa sobre a cidade do Rio de Janeiro, buscando ilustrar o potencial de emprego da metodologia proposta na presente dissertação como subsídio complementar ao monitoramento de condições atmosféricas que podem vir a ser melhor exploradas oportunamente em diferentes cenários sob as perspectivas da meteorologia e da hidrometeorologia, inclusive sob o ponto de vista de emprego no suporte ao desenvolvimento de estudos climatológicos.

Primeiramente, para ambos os eventos, apresenta-se um panorama geral sobre os sistemas atuantes e sua evolução temporal alinhada ao comportamento da precipitação sobre o município do Rio de Janeiro (MRJ). Em especial, exploram-se os dias entre 24/04/2011 e 26/04/2011, que configura o primeiro evento, e os dias entre 14/02/2018 e 15/02/2018, que corresponde ao segundo evento.

### **5.1. Estudo do caso de chuva intensa sobre o município do Rio de Janeiro de 24/04/2011 a 26/04/2011**

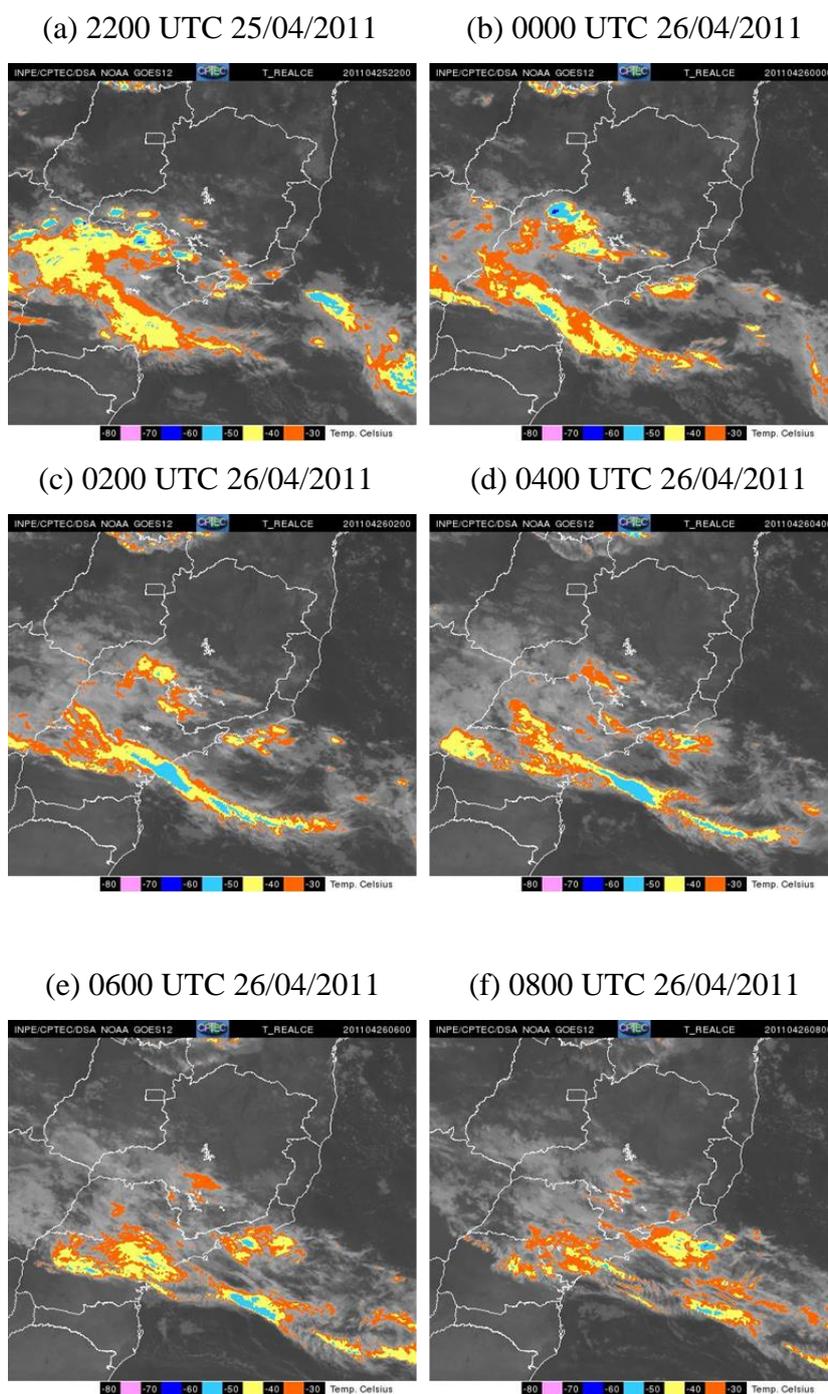
Classificado, segundo o Sistema Alerta Rio, como uma das dez maiores chuvas em 24h desde 1997 sobre o MRJ, o caso da noite de 25/04/2011 e da madrugada de 26/04/2011 tem seu início com a passagem de uma frente fria sobre o oceano, próximo ao MRJ na tarde do dia 24/04/2011. Nesse período, ocorreu chuva intensa a muito intensa na cidade, causando diversos transtornos, como alagamentos, transbordamento do rio Maracanã e corte temporário no fornecimento de energia em alguns bairros.

As imagens do GOES-12 utilizadas na análise das condições atmosféricas no período de estudo estão disponíveis no sítio da Divisão de Satélites e Sistema Ambiental (DSA) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE): <<http://satellite.cptec.inpe.br/acervo>>.

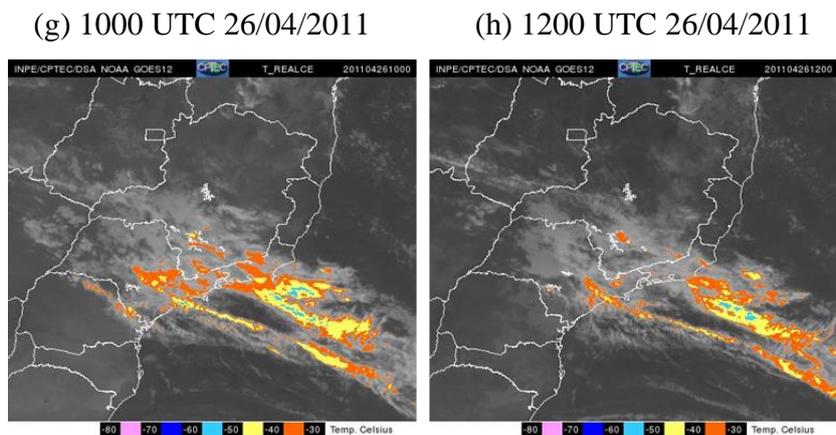
#### **5.1.1. Imagens de satélite e acumulados de chuva**

A Figura 5.1 mostra a evolução dos núcleos de chuva, intrínsecos ao sistema frontal (SF), que atuaram sobre o MRJ durante o caso estudado. A partir do final da noite do dia 25/04/2011, observa-se aumento na atividade convectiva sobre o MRJ e vizinhança (Figura 5.1 b, c). Na madrugada do dia 26/04/2011, os núcleos ganham força (Figura 5.1

d, e, f). Na manhã do mesmo dia, com o afastamento do SF para o oceano, os núcleos enfraquecem sobre o MRJ (Figura 5.1.g e Figura 5.1h).



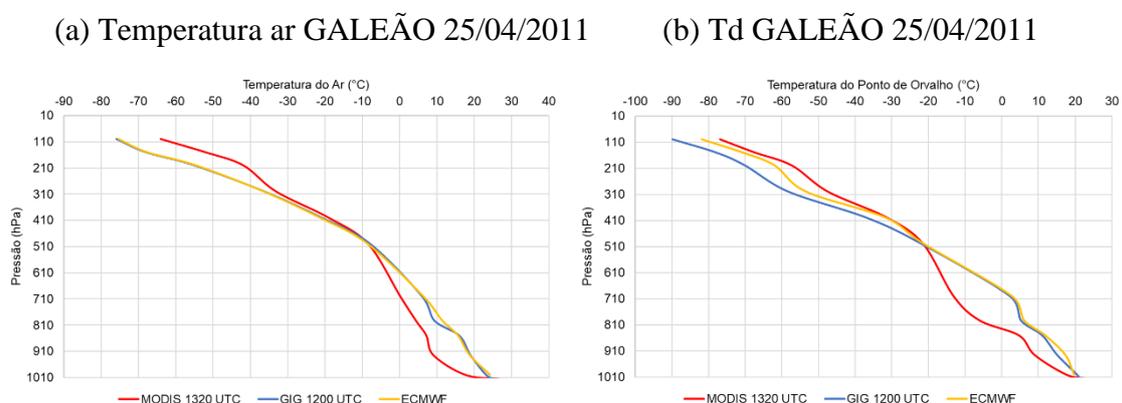
**Figura 5.1** – Imagens do satélite GOES-12 no canal infravermelho com temperatura de topo das nuvens (°C): (a) 2200 UTC 25/04/2011, (b) 0000 UTC 26/04/2011, (c) 0200 UTC 26/04/2011, (d) 0400 UTC 26/04/2011, (e) 0600 UTC 26/04/2011, (f) 0800 UTC 26/04/2011, (g) 1000 UTC 26/04/2011 e (h) 1200 UTC 26/04/2011. Fonte: CPTEC/INPE.



**Figura 5.1** – Continuação.

### 5.1.2. Produto MODIS, radiossondagem e reanálise no dia 25/04/2011

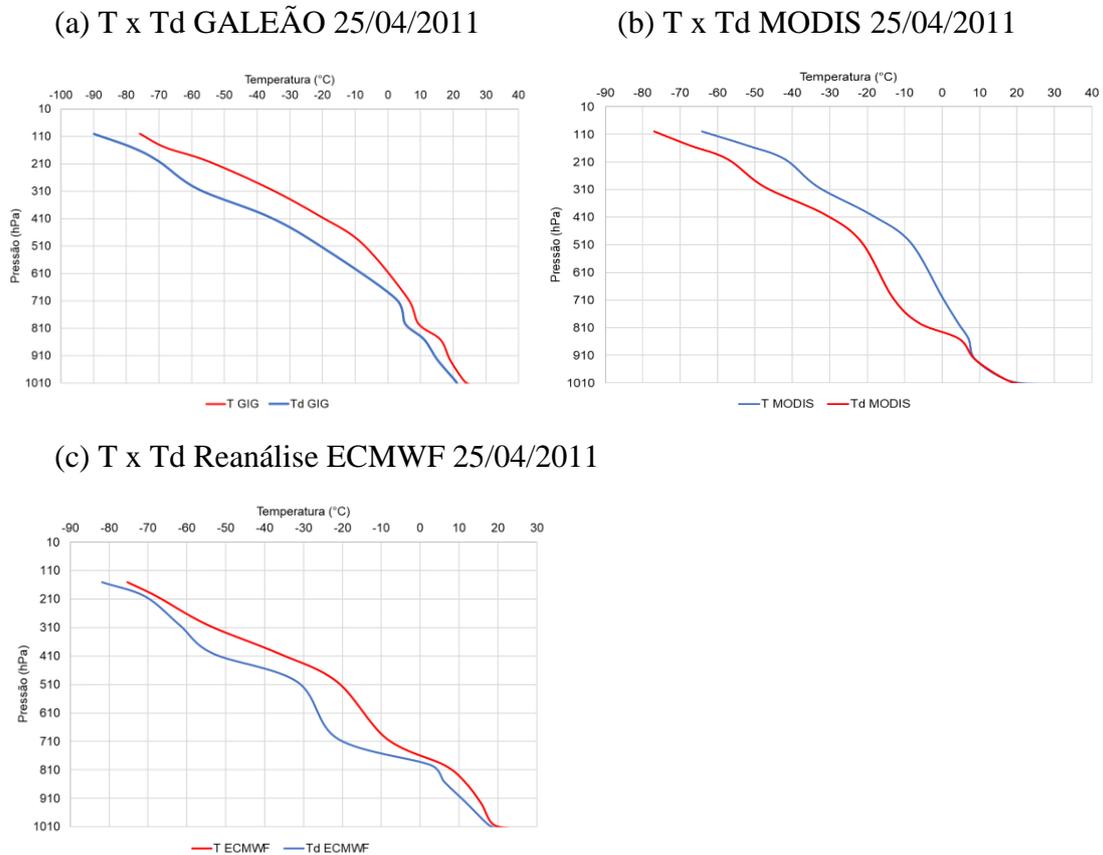
Na Figura 5.2a, são apresentados os resultados para temperatura do ar, enquanto, na Figura 5.2b, está disposta a temperatura do ponto de orvalho sobre o Galeão na tarde do dia 25/04/2011, ambos os perfis obtidos pela radiossondagem, pelo MODIS e pela reanálise. Observa-se que, próximo à superfície, ambas as temperaturas estimadas pelo MODIS, T e Td, subestimam as temperaturas obtidas pela sondagem. Em níveis médios, os valores aproximam-se e, em seguida, afastam-se novamente, sendo que, agora, com T e Td do MODIS superando os valores obtidos por meio das radiossondagens.



**Figura 5.2** – Perfil atmosférico em 25/04/2011 sobre o Galeão (1200 UTC) por radiossondagem, produto MODIS (1320 UTC) e reanálise ECMWF: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).

Comparando os perfis atmosféricos obtidos com a radiossondagem (Figura 5.3a), com o produto do MODIS (Figura 5.3b) e com a reanálise (Figura 5.3c) sobre o Galeão,

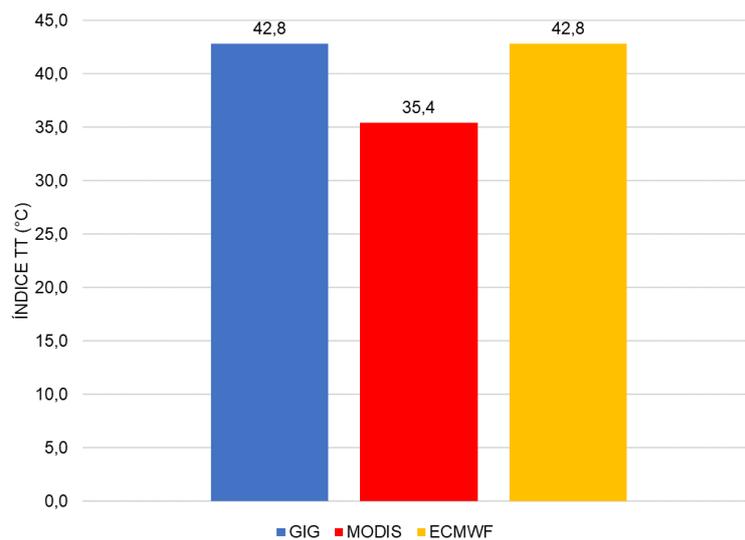
na tarde do dia 25/04/2011, pode-se notar uma significativa semelhança ao longo de todos os níveis. A maior diferença que se apresenta é em níveis próximos à superfície, onde o MODIS mostra uma atmosfera saturada, enquanto a radiossondagem apresenta certa umidade, mas não há saturação. O perfil produzido com ECMWF não mostra grande diferença com relação aos demais.



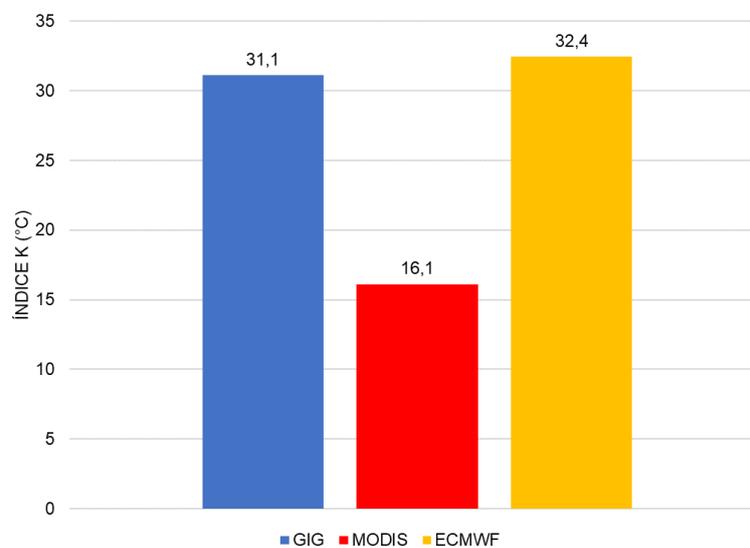
**Figura 5.3** – Perfis atmosféricos de T e Td em 25/04/2011 sobre o Galeão (1200 UTC) por radiossondagem e pelo produto MODIS (1320 UTC): (a) radiossondagem, (b) MODIS e (c) reanálise ECMWF.

Na Figura 5.4, estão apresentados os índices de instabilidade calculados com os dados coletados pela radiossondagem, calculados com as informações da reanálise e estimados pelo MODIS. Observa-se que, para o caso desse dia (25/04/2011), radiossondagem, reanálise e MODIS apresentaram uma larga diferença entre os valores dos índices. Seguindo os valores limítrofes estabelecidos em Nascimento (2005), os índices da radiossondagem e da reanálise mostram instabilidade atmosférica, enquanto os índices pelo MODIS não mostraram instabilidade presente na atmosfera nesse horário.

(a) Índice Total Totals

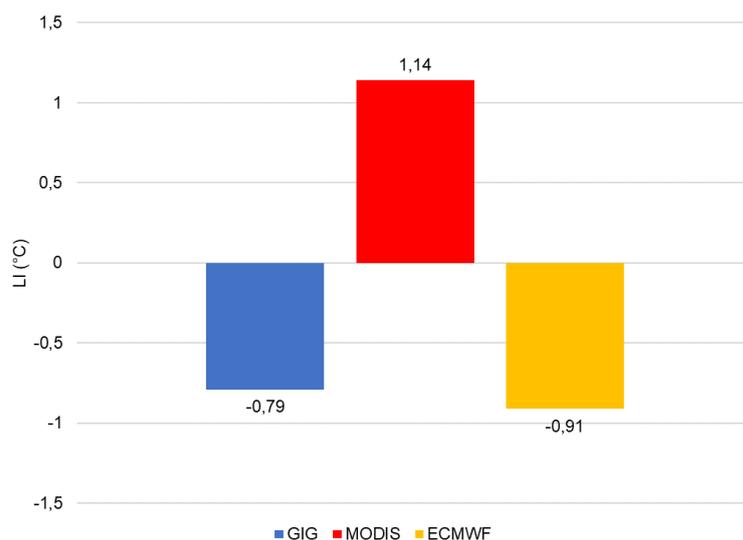


(b) Índice K



**Figura 5.4** – Valores dos índices de instabilidade TT, K e LI sobre o Galeão obtidos pela radiossondagem (azul), MODIS (vermelho) e reanálise ECMWF (amarelo) em 25/04/2011.

(b) *Lifted Index*



**Figura 5.4** – Continuação.

### 5.1.3. PW em 25/04/2011

A água precipitável total na atmosfera e suas normalizações apresentadas anteriormente foram também calculadas com as informações das três (3) diferentes fontes no dia 25/04/2011 (Tabela 5.1). Observa-se que, com relação ao resultado do MODIS, o valor de PW supera os valores encontrados com as outras fontes.

**Tabela 5.1** – PW, NPW e XPW calculados com informações do MODIS, sondagem GIG e reanálise ECMWF em 25/04/2011.

Fonte	PW (mm)	NPW	XPW
GIG	34,10	0,44	0,47
MODIS	54,92	0,35	0,44
ECMWF	32,83	0,23	0,43

## 5.2. Estudo do caso de chuva intensa sobre o município do Rio de Janeiro de 14/02/2018 a 15/02/2018

No dia 14/02/2018, chegou, na região sudeste do Brasil, uma frente fria, que, nesse mesmo dia e no dia seguinte, ocasionou, no MRJ, chuvas e ventos intensos, causando

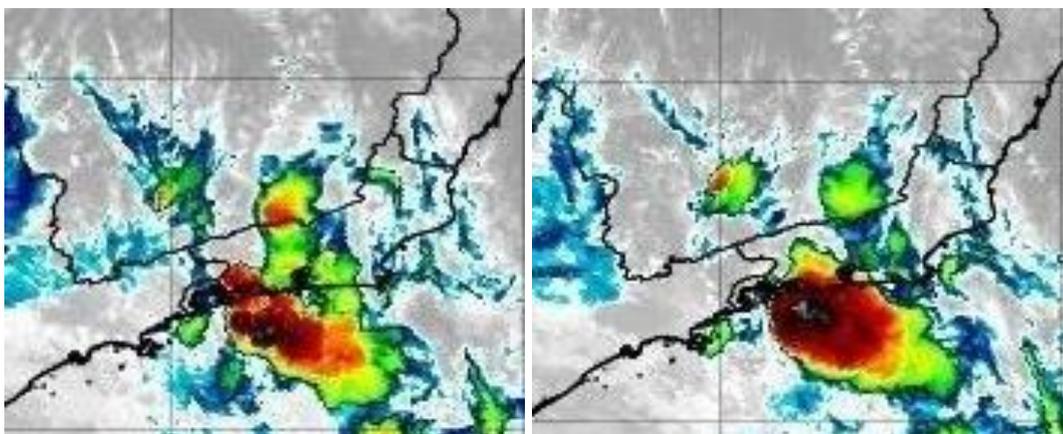
diversos transtornos à população. Segundo o Sistema Alerta Rio, no final do dia 14/02/2018 e no início do dia 15/02/2018, foram computadas três dos dez maiores acumulados de chuva em 1 hora na cidade. Às 23h45 do dia 14/02/2018, na estação Barra/Riocentro, o acumulado foi de 123,2 mm/h, e, às 00h00 do dia seguinte, os maiores acumulados foram 109,6 mm/h e 106,6 mm/h nas estações Jacarepaguá/Cidade de Deus e Piedade, respectivamente.

### 5.2.1. Imagens de satélite e acumulados de chuva

A Figura 5.5 mostra a evolução do núcleo de chuva por imagens do canal infravermelho com temperatura do topo das nuvens do satélite GOES-16. Embebido no SF atuante sobre a região, estava o núcleo que causou as fortes chuvas e os ventos na noite do dia 14/02/2018 e na madrugada do 15/02/2018. É possível notar, na Figura 5.5b, que, às 0000 UTC do 14/02/2018 (21h00 local), o sistema chega ao MRJ, primeiramente causando ventos fortes a muito fortes. Nas horas que se seguiram, deu-se o início da chuva, conforme o sistema ganhava força. Especialmente nos horários 0200 UTC e 0300 UTC (Figura 5.5d e Figura 5.5e), ocorreram as maiores chuvas horárias citadas no tópico anterior. Às 0400 UTC (Figura 5.5f), o sistema já apresentava decaimento sobre o MRJ, enquanto duas horas depois (Figura 5.5h) já não estava mais atuando sobre a região.

(a) 2300 UTC 14/02/2018

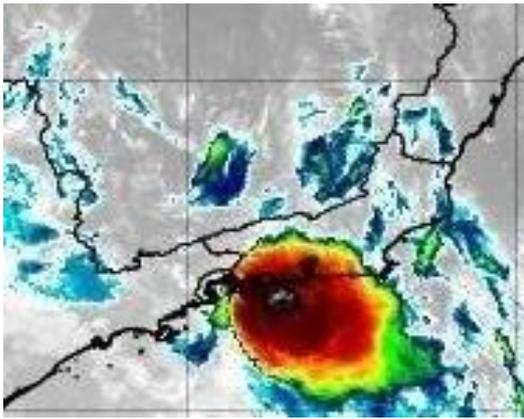
(b) 0000 UTC 15/02/2018



**Figura 5.5** – Imagens do satélite GOES-16 no canal infravermelho com temperatura de topo das nuvens (°C): (a) 2300 UTC 14/02/2018, (b) 0000 UTC 15/02/2018, (c) 0100 UTC 15/02/2018, (d) 0200 UTC 15/02/2018, (e) 0300 UTC 15/02/2018, (f) 0400 UTC 15/02/2018, (g) 0500 UTC 15/02/2018 e (h) 0600 UTC 15/02/2018. Fonte: CPTEC/INPE.

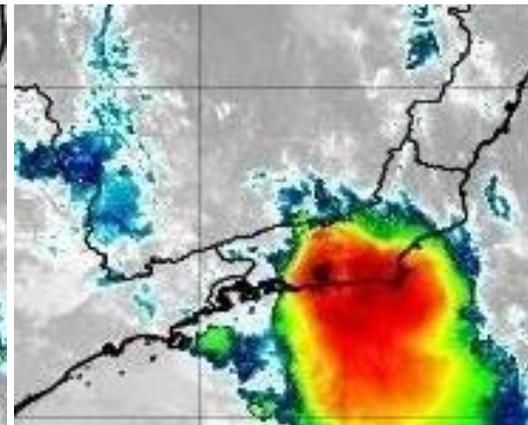
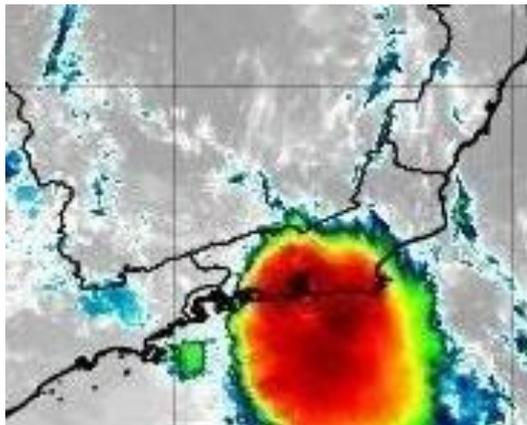
(c) 0100 UTC 15/02/2018

(d) 0200 UTC 15/02/2018



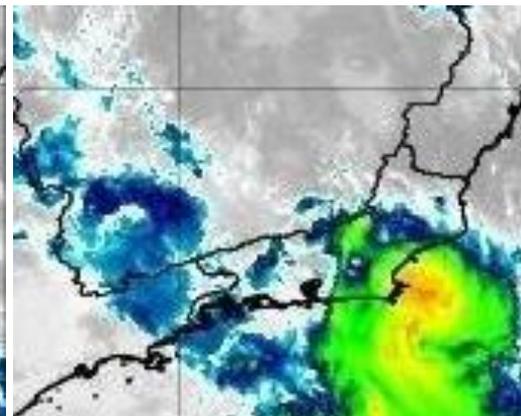
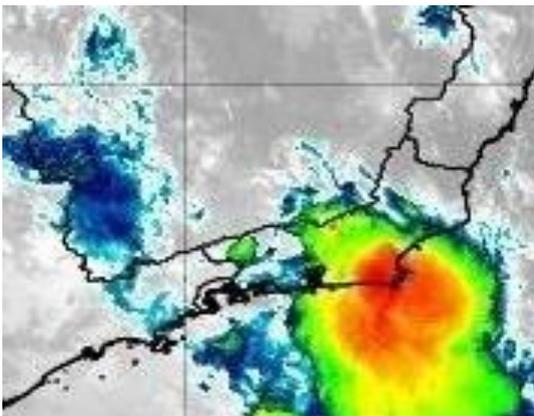
(e) 0300 UTC 15/02/2018

(f) 0400 UTC 15/02/2018



(g) 0500 UTC 15/02/2018

(h) 0600 UTC 15/02/2018

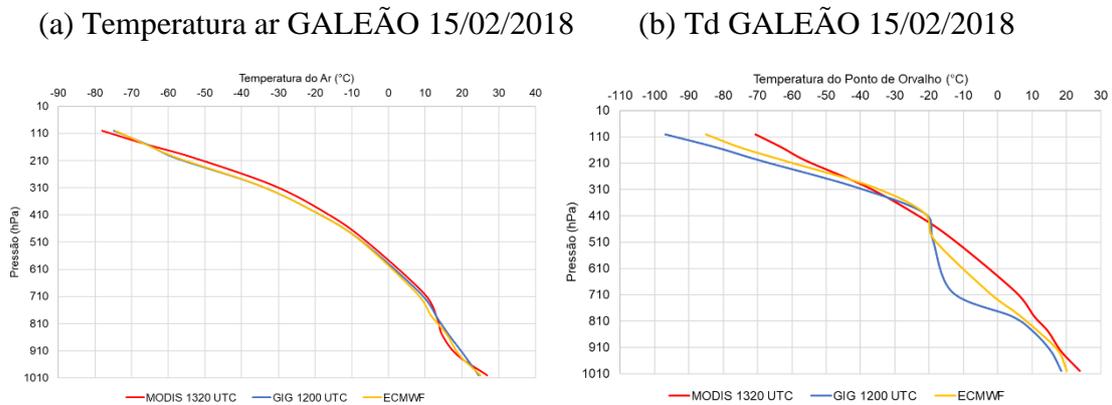


**Figura 5.5** – Continuação.

### 5.2.2. Produto MODIS, radiossondagem e reanálise no dia 15/02/2018

Na Figura 5.6, estão apresentados os perfis de temperatura do ar (a) e temperatura do ponto de orvalho (b) obtidos com informações da sondagem do Galeão, produto do MODIS e da reanálise no dia 15/02/2018 nos horários mais próximos a 1200 UTC. Com

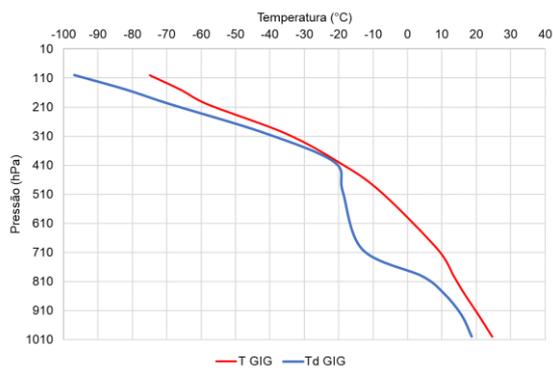
relação a temperatura do ar, pode-se notar significativa semelhança dos resultados de todas as fontes ao longo de toda atmosfera vertical local. Já com relação a Td, existe bastante divergência entre as fontes, especialmente nos níveis baixos-médios da atmosfera (780 hPa – 400 hPa).



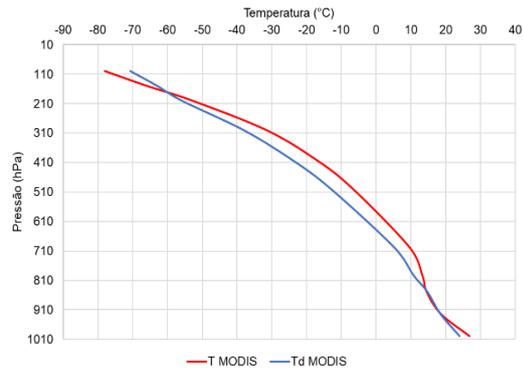
**Figura 5.6** – Perfil atmosférico em 15/02/2018 sobre o Galeão (1200 UTC) por radiossondagem, produto MODIS (1320 UTC) e reanálise ECMWF: (a) temperatura do ar (°C); (b) temperatura do ponto de orvalho (°C).

Comparando os diferentes perfis atmosféricos (Figura 5.7), observa-se que, na sondagem (Figura 5.7a) existe um distanciamento entre T e Td a partir de 810 hPa, que se estende até 410 hPa, quando as curvas se encontram. No perfil gerado com a reanálise (Figura 5.7c), esse distanciamento é menos proeminente e começa mais próximo à superfície. No perfil criado com o produto do MODIS (Figura 5.7b), o distanciamento é ainda menos evidente e estende-se até níveis altos. Essa diferença entre os perfis modifica diretamente os índices termodinâmicos, resultando em divergências de instabilidade atmosférica entre os perfis das diferentes fontes.

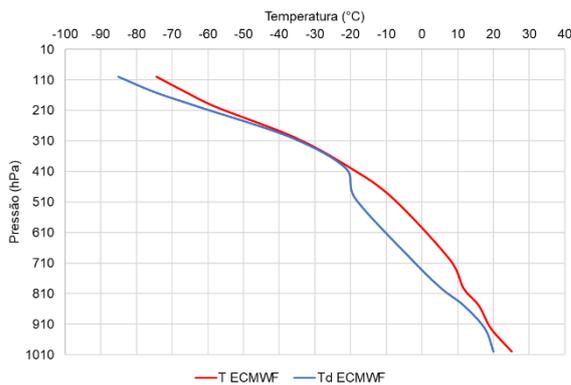
(a) T x Td GALEÃO 15/08/2018



(b) T x Td MODIS 15/02/2018



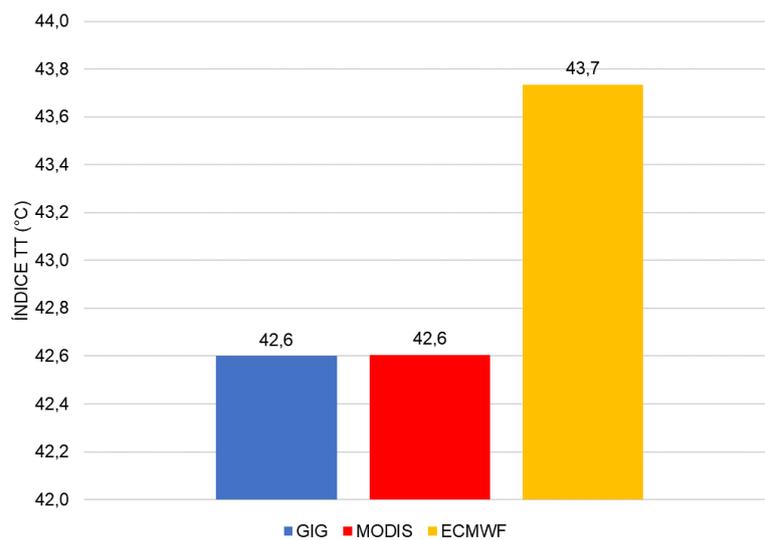
(c) T x Td Reanálise ECMWF 15/02/2018



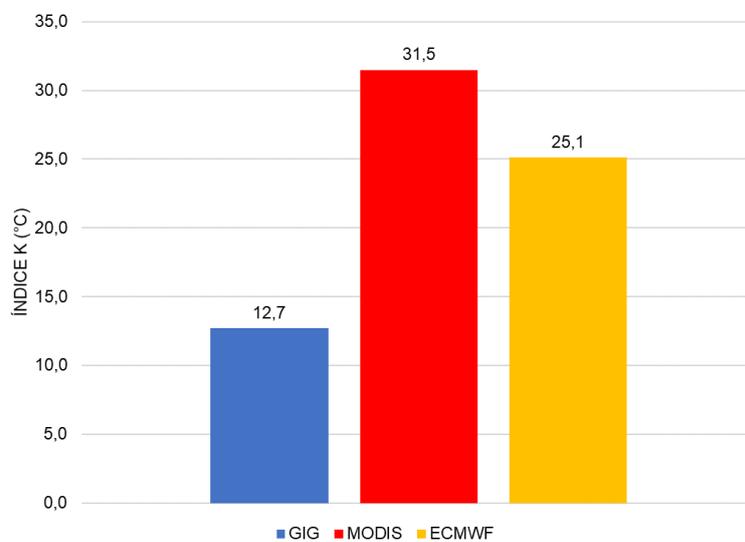
**Figura 5.7** – Perfis atmosféricos de T e Td em 15/02/2018 sobre o Galeão (1200 UTC) por radiossondagem e pelo produto MODIS (1320 UTC): (a) radiossondagem, (b) MODIS e (c) reanálise ECMWF.

Na Figura 5.18, estão apresentados os índices de instabilidade calculados com os dados coletados pela radiossondagem, pela reanálise ECMWF e estimados pelo MODIS. Observa-se que, para o caso desse dia (15/02/2018), com relação ao índice TT, todas as fontes concordam apontando para instabilidade alta. Com relação aos demais índices, mesmo havendo diferenças, todos os valores representam pouca instabilidade segundo a referência utilizada. Assim, pode-se dizer que, no caso de 15/02/2018, os índices de instabilidade TT, K e LI das diferentes fontes direcionam para a mesma leitura da atmosfera.

(a) Índice Total Totals

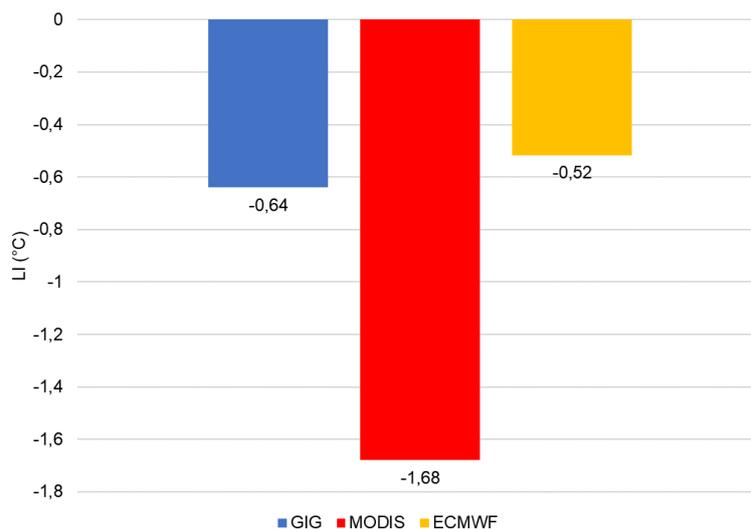


(b) Índice K



**Figura 5.8** – Valores dos índices de instabilidade TT, K e LI sobre o Galeão obtidos pela radiossondagem (azul), MODIS (vermelho) e reanálise ECMWF (amarelo) em 15/02/2018.

(c) *Lifted Index*



**Figura 5.8** – Continuação.

### 5.2.3. PW em 15/02/2018

No dia 15/02/2018, assim como no caso anterior, os resultados com reanálise ECMWF e radiossondagem são mais próximos, enquanto o resultado com o MODIS mostra significativo distanciamento (Tabela 5.2). O valor de PW do MODIS supera os outros valores calculados.

**Tabela 5.2** – PW, NPW e XPW calculados com informações do MODIS, sondagem GIG e reanálise ECMWF em 15/02/2018.

Fonte	PW (mm)	NPW	XPW
GIG	36,85	0,72	0,52
MODIS	53,09	-0,15	0,41
ECMWF	29,80	-0,08	0,37

### 5.3. Síntese dos resultados das análises de caso

Na Tabela 5.3, estão apresentados os resultados da correlação e de RMSE feitos para comparar as temperaturas estimadas pelo MODIS, radiossondagem e reanálise ECMWF. Na Tabela 5.4, está apresentada a análise de contingência com todos os valores dos

índices de instabilidade avaliados nos casos de chuva intensa. Os valores a, b, c, d foram calculados com os resultados obtidos com a reanálise e com o MODIS e comparados com os valores das radiossondagens.

**Tabela 5.3** – Resultados da comparação entre radiossondagem e MODIS e entre radiossondagem e reanálise EMCWF nos dias 25/04/2011 e 18/02/2018.

Fontes	Dia/Mês/Ano	Correlação T	Correlação Td	RMSE T (°C)	RMSE Td (°C)
GIG-MODIS	25/04/2011	0,991	0,988	8,42	8,94
GIG-ECMWF	25/04/2011	0,999	0,990	0,79	4,23
GIG-MODIS	15/02/2018	0,998	0,984	2,57	12,48
GIG-ECMWF	15/02/2018	1,000	0,997	0,83	5,84

**Tabela 5.4** – Síntese dos resultados obtidos para os índices TT, K e LI nos dois estudos de caso.

	TT	K	LI
a	6	1	3
b	1	4	2
c	0	0	0
d	0	2	2
AC	0,85	0,43	0,71
SR	0,85	0,20	0,60
POD	0,46	0,17	0,38
FAR	0	0	0

Os resultados apontam uma alta correlação entre T e Td oriundos das diferentes fontes. No caso do dia 25/04/2011, o valor de RMSE mostra uma distância significativa entre essas variáveis, chegando a 8,94°C de erro entre radiossondagem e MODIS, enquanto é observado RMSE de 4,23°C entre a radiossondagem e a reanálise ECMWF para Td. Com relação a variável T, o RMSE calculado entre a radiossondagem e a reanálise ECMWF, nesse dia, é 0,79°C, enquanto o valor entre radiossondagem e MODIS é 8,42°C. No caso do dia 15/02/2018, todos os resultados de RMSE apresentaram valores maiores se comparados ao evento anterior.

No que diz respeito aos valores obtidos dos índices de instabilidade TT, K e LI, segundo Tabela 5.4, pode-se observar que os melhores resultados foram para o índice TT, que apontou maior acurácia, taxa de sucesso e probabilidade de detecção. Em nenhum dos dois casos, houve falsos alarmes, ou seja, não houve, nos dias analisados, instabilidade observada pelo MODIS e pela reanálise que não tivesse sido observada nas radiossondagens. Observa-se também que, similar às análises sobre a Ilha do Fundão, com base nas radiossondagens lançadas a partir do Instituto de Geociências (IGEO) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), o índice de instabilidade TT calculado com o MODIS foi o que mais se aproximou dos valores das radiossondagens. Registra-se ainda que o índice K foi o que apresentou resultados mais distantes quando se contrasta com os índices obtidos por meio das radiossondagens.

Diante dessas observações, pode-se afirmar que o presente capítulo ilustrou o potencial dos produtos de satélite, entre outras informações, no monitoramento meteorológico de eventos pluviométricos. Optou-se pela seleção de dois eventos de chuva extrema que impactaram a cidade do Rio de Janeiro para mostrar a possibilidade do uso de informações de satelitais.

Na análise, explorou-se, em especial, a inclusão de dados MODIS, operados em satélites de órbita polar, como complemento potencial para fornecer subsídios ao monitoramento atmosférico, sobretudo em termos de análise de perfis atmosféricos e no que concerne à obtenção de alguns indicadores, notadamente, no caso desta pesquisa, o índice K (K), Total Totals (TT) e o índice de levantamento (LI).

Naturalmente, é possível adicionar outros indicadores e produtos para que o caminho percorrido possa ser ainda mais desenvolvido, aprofundado e consolidado, com aplicações na cidade do Rio de Janeiro bem como em outras áreas do Brasil. Mostrou-se que os dados MODIS podem ser explorados principalmente em conjunto com outros produtos, usando o potencial de ter longas séries de dados, atualmente com mais de 20 anos de informação.

Nesse sentido, com base no referencial de análise adotado e com suporte na discussão de resultados estabelecidos ao longo do Capítulo 4 e do Capítulo 5, o Capítulo 6 apresenta, em síntese, as conclusões e recomendações para a presente dissertação.

## Capítulo 6 - Conclusões e Recomendações

### 6.1. Considerações finais

A pesquisa proposta busca estabelecer uma avaliação dos produtos de satélite MODIS, que permitem obter uma radiografia do perfil atmosférico. São examinados aspectos quanto a sua fundamentação técnico-científica e quanto à empregabilidade na análise das condições atmosféricas e potencial auxílio no monitoramento meteorológico e provimento de subsídios para estudos climatológicos.

De forma mais ampla, propôs-se fazer uso de uma base de dados de radiossondagens liberadas diariamente sobre o Aeroporto Internacional do Galeão, que foram obtidas em pesquisas desenvolvidas previamente junto ao Laboratório de Recursos Hídricos e Estudos do Meio Ambiente (LABH2O) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ e de reanálise ECMWF – ERA 5 para estudar a viabilidade e o potencial de uso de dados de satélite de órbita polar na análise da estrutura atmosférica vertical sobre a cidade do Rio de Janeiro.

Tratando-se da cidade do Rio de Janeiro, é de suma importância a compreensão e a detecção das características atmosféricas precursoras de eventos de chuva intensa. Avalia-se ser o uso de informações de satélite um canal importante a ser explorado em conjunto com dados coletados de superfície objetivando aperfeiçoar as estimativas de precipitações em um dado local. Nesse sentido, exploram-se dados obtidos sobre a cidade do Rio de Janeiro na década de 2011 a 2020.

Foram comparadas as variáveis disponíveis nos produtos empregados bem como também as variáveis calculadas a partir das informações disponíveis. As fontes utilizadas foram as radiossondagens sobre o Aeroporto Internacional do Galeão e Ilha do Fundão, a reanálise ECMWF – ERA5 e o produto MOD07\_L2 do sensor MODIS a bordo do satélite TERRA. As variáveis extraídas foram temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, umidade relativa, índices termodinâmicos/dinâmicos índice K, índice de levantamento (LI) e Total Totals. A variável calculada para análise foi água precipitável (PW).

Na sequência, apresentam-se algumas conclusões extraídas do trabalho. Mais adiante, são discriminadas recomendações que podem representar desdobramentos naturais e propositivos da presente pesquisa.

## 6.2. Conclusões

Inicialmente, pode-se afirmar que as primeiras análises entre as radiossondagens lançadas sobre o Aeroporto Galeão e as sondagens do produto do MODIS apontam correlação positiva e acima de 0,7 em alguns níveis e aceitável RMSE, BIAS e KGE para temperatura do ar (Tabela 4.1a). No entanto, para Td, as estatísticas apresentaram grandes variações nível a nível com altos valores de RMSE e BIAS (Tabela 4.1b).

Com PW, observou-se que os valores do MODIS superestimam os valores das sondagens em todo o período analisado, o que pode ser explicado pelo resultado anterior de Td do MODIS, muito acima do valor de Td das sondagens. Utilizando os valores mínimos do MODIS, é possível diminuir a distância dos valores das sondagens (Figura 4.3), contudo a melhora não é tão significativa.

A avaliação dos dados MODIS incorporou ainda fonte de informações oriundas de reanálises, mais especificamente dados da reanálise ECMWF - ERA 5. Sendo a reanálise também composta por dados de radiossondagem e informações de satélite, observou-se que definitivamente existe um distanciamento entre dados MODIS e informações coletadas diretamente da atmosfera.

A fim de descobrir os fatores que contribuíram para as diferenças observadas entre Td das sondagens do MODIS, foi conduzida uma análise em três situações diferentes, ou seja, dias com PW máximo, médio e mínimo (Tabela 4.5). Também foram investigados os valores de cada píxel utilizado na composição da informação do MODIS (Figura 4.14). Concluiu-se que os altos valores de Td do MODIS independem das condições da atmosfera local e da região do píxel.

Das radiossondagens lançadas sobre a Ilha do Fundão de 2016 a 2018 (Silva, 2019), resgataram-se três dias, que foram, então, comparados com as informações do MOD07 sobre a Ilha do Fundão. Foi observada boa correlação entre T e Td das duas fontes, no entanto os valores de RMSE variaram dia a dia, apresentando altos valores para ambas as variáveis. Com relação aos índices de instabilidade, os valores estimados pelo MODIS não apresentaram qualquer falso alarme, sendo o índice TT do MODIS aquele que mais frequentemente assume valor próximo àquele coletado por meio das radiossondagens (Tabela 4.9).

Além das análises diretas feitas com os 10 anos de dados sobre o Aeroporto Galeão e com os três dias específicos sobre a Ilha do Fundão, a fim de determinar a aplicabilidade do produto do MODIS no monitoramento de condições atmosféricas, as informações

obtidas foram adicionalmente aplicadas a dois casos de chuva intensa que ocorreram na cidade do Rio de Janeiro. Os eventos fazem parte da lista das 10 maiores chuvas sobre a cidade do Rio de Janeiro fornecida pelo Sistema Alerta Rio.

Note-se que os dois estudos de caso selecionados são meramente ilustrativos quanto ao uso do produto MODIS para fins de perfilagem atmosférica, mas intenciona-se deixar uma semente para que discussões oportunas possam vir a ser feitas no sentido de eventual incorporação dessas informações na previsão de eventos chuvosos, notadamente de forma complementar aos procedimentos e dados adotados atualmente para desempenhar tal tarefa.

O primeiro estudo de caso trabalhou sobre o evento da noite do dia 25/04/2011 e madrugada do 26/04/2011. Foram extraídos os dados MODIS, radiossondagem e reanálise ECMWF sobre o Galeão às 1200 UTC do dia 25/04/2011. Foi possível observar que o perfil atmosférico retratado pelo produto do MODIS e pela radiossondagem e reanálise apresentava diversas divergências, especialmente para Td, culminando em índices de instabilidade e PW discordantes.

O segundo estudo de caso tratou do evento de 14/02/2018. Nesse caso, os resultados para T mostraram-se melhores se comparados ao primeiro caso. Ainda com grande divergência entre Td da sondagem e o MODIS, PW novamente apresentou resultados distantes. Ainda nesse caso, os índices de instabilidade das diferentes fontes apontaram para a mesma condição de instabilidade atmosférica.

Ao final de toda a investigação e análises conduzidas, pode-se concluir que o produto MOD07 apresenta resultados satisfatórios no que diz respeito à temperatura do ar na coluna atmosférica sobre a região de estudo, especialmente nas camadas mais próximas a superfície. Essa variável é passível de utilização sem outras modificações. Tratando-se da temperatura do ponto de orvalho, o seu uso pode ser feito na determinação de PW normalizado. Sugere-se cautela na utilização direta de Td do MODIS. É necessário destacar também os bons resultados obtidos com a reanálise ECMWF – ERA 5, que se mostrou uma ótima opção de perfilamento atmosférico sobre a região de estudo, mostrando-se uma boa base de dados para validação do produto MODIS, ainda que com escalas espaciais diferenciadas de aquisição.

Diante do desafio de desenvolver um trabalho de certa forma precursor quando ao uso de dados de satélite de órbita polar para perfilagem atmosférica, notadamente do produto MODIS do satélite TERRA, foi possível identificar diversas áreas que podem vir a ser exploradas a partir da pesquisa realizada, consoante limitações do estudo

anteriormente expostas no documento em seções ao final dos Capítulos 4 e 5, onde resultados são apresentados e discutidos.

### **6.3. Recomendações**

Ao longo da concepção, implementação e aplicação da metodologia proposta pelo trabalho, foi revelado o potencial de uso do produto do MODIS para perfilagem atmosférica. O estudo mostrou que podem ser desenvolvidos trabalhos que passam por aspectos de monitoramento atmosférico e exploram aspectos climatológicos até questões de impactos em bacias hidrográficas na medida em que se avance na prospecção de pesquisas sobre a interrelação entre a atmosfera e superfície terrestre continental bem como na conexão do sistema atmosfera-oceano.

Embora o estudo tenha se concentrado sobre a cidade do Rio de Janeiro, observou-se a possibilidade de extensão da análise em diferentes áreas geográficas do planeta com um bom grau de detalhamento em termos de resolução espacial, além de se poder usufruir desse tipo de informação por diversos períodos de tempo e em escalas diferentes, o que oferece uma base de dados bastante robusta para análise.

Por outro lado, houve a possibilidade de discussão, no texto, conforme bem expõe a seção 4.8, sobre limitações do estudo e limitações intrínsecas dos dados de sensoriamento remoto de órbita polar, como é o caso do MODIS, que pode ser obtido pelos satélites TERRA e AQUA. De fato, as limitações abrem possibilidades para novas investigações e revelam caminhos para novos trabalhos, encerrando em si o escopo de um conjunto de recomendações inerentes e associados ao presente trabalho.

Entre elas, por exemplo, a presença de nuvens impossibilita a leitura dos dados em dias nublados/encobertos sobre a região. Mesmo assim, foi visto que é possível obter as informações desejadas momentos antes de um caso de chuva intensa que está inevitavelmente associado à presença de nuvens, uma vez que a resolução espacial detalhada de 5 km e a contínua operação na escala diária podem vir a compensar parcialmente essa limitação, considerando-se ainda que se trata de informações adicionais àquelas que já são empregadas, como é o caso de bases de dados de satélites geostacionários ou mesmo informações de satélites de órbita polar que operam na faixa de micro-ondas ou ainda oriundas, por exemplo, de radar meteorológico porventura disponível na região de interesse.

No estudo, identificou-se uma limitação mais severa quanto aos perfis de temperatura do ponto de orvalho ( $T_d$ ), tendo-se obtido um bom desempenho para os perfis de temperatura de ar. Nesse sentido, recomenda-se uma investigação mais aprofundada do produto MOD07\_L2 empregado nesta dissertação, notadamente o sobretudo quanto ao melhor entendimento dos algoritmos que compõem a sua geração.

Nesse sentido, cabe ainda recomendar um estudo mais aprofundado dos índices de instabilidade dinâmicos e termodinâmicos. O presente trabalho estudou três (3) indicadores, notadamente o índice K (K), Total Totals (TT) e o índice de levantamento (LI).

Essa frente de trabalho pode ser mais aprofundada, recomendando-se, por exemplo, estudar melhor, entre outras medidas, a aplicabilidade do índice de energia potencial convectiva disponível (CAPE), pois trata do exame conjunto dos perfis de temperatura e de temperatura de orvalho, o que pode aduzir uma nova perspectiva no monitoramento atmosférico.

Novas métodos e métricas estatísticas encontram uma base fértil de dados consolidados para que outros desdobramentos possam ser tratados e incorporados na base de conhecimento meteorológico e hidrológico. Por exemplo, o uso de dados de receptores que compõem o sistema global de navegação por satélite (em inglês, *Global Navigation Satellite System* – GNSS) fornecem uma base escassamente empregada para estimativa de água na atmosfera, o que proporcionaria um referencial de análise sinérgico em contraste e, simultaneamente, em atuação complementar ao dado MODIS, segundo as diretrizes da investigação conduzida nesta dissertação.

Observe-se, portanto, que o dado MODIS constitui apenas uma das fontes de dados de sensoriamento remoto, ainda não suficientemente explorada, como mostra a presente pesquisa, que se soma a diversas missões espaciais, de órbitas polar e geoestacionário, que estão em operação e que entrarão em atividade nos próximos anos, seja por meio de satélites convencionais ou de nanosatélites, incluindo a obtenção de outras informações que não dizem respeito tão somente ao ciclo hidrológico, mas também aos ciclos biogeoquímicos. Em especial, destaca-se que essas informações podem oferecer significativa contribuição para inovação e aprimoramento científico-tecnológico no nível nacional e no nível internacional, o que é fundamental para trazer novas luzes quanto ao tratamento de problemas associados ao monitoramento e à previsão de eventos pluviométricos bem como à identificação de mudanças climáticas.

Nesse ponto, inclui-se a questão dos gases de efeito estufa, tão sensíveis para a humanidade, quando a discussão se desloca para a correspondente sustentabilidade global planetária, incentivando a discussão sobre energias renováveis de forma a modificar a matriz de energia hoje vigente nos diversos países.

A agenda mundial tem focado de forma bastante notável a questão do que se convencionou denominar de mudanças climáticas, pauta que tem recebido atenção do concerto das nações e dos diversos organismos nacionais e internacionais. Assim, variações da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, posicionamento e intensidade de sistemas de alta e baixa pressão, variações da temperatura superficial do mar, estudos de ilhas de calor urbano e delimitação de zoneamento climático de cidades, entre outros estudos, merecem atenção redobrada, recomendando-se pesquisas nessa direção, tendo em vista a base de dados empregada na dissertação.

Diante dessas reflexões, espera-se que o presente trabalho contribua para o melhor entendimento do comportamento atmosférico de uma determinada região conjugando dados de satélite e dados de superfície, buscando-se aperfeiçoar estimativas de precipitação e de monitoramento climatológico interligados especialmente com questões que conectam a atmosfera com impactos na superfície terrestre, quer sob o ponto de vista do ciclo hidrológico, quer sob o ponto de vista de ciclos biogeoquímico, em diferentes biomas e em diferentes partes do planeta.

## Referências Bibliográficas

- ALLEN, R., TASUMI, M., TREZZA, R. "Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration With Internalized Calibration (METRIC) – Model." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 133, n. 4., 2007.
- ANDRADE, K. M., PINHEIRO, H. R., NETO, G. D. "Atmospheric characteristics that induce extreme precipitation in frontal systems over Southeastern Brazil during summer: Observations and atmospheric model simulation." *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 37 Ed. Especial SIC, pp. 175 – 180, 2015.
- ARAUJO, L. M. N. "Identificação de padrões hidrológicos de precipitação e de umidade do solo na bacia hidrográfica do rio Piabanha/RJ (Identification of precipitation and soil moisture hydrological patterns at Piabanha/RJ river basin), *D. Sc. Thesis, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 236p, 2016.
- BAIMA, F. B. S., KARAM, H. A. "Análise da Estrutura Termodinâmica Associada ao Desenvolvimento de Tempestade Ocorrida entre 17 e 18 de março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil." *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 37, pp. 17-26, 2014.
- BARCELLOS, P. C. L. "Precipitação intensa na cidade do Rio de Janeiro: probabilidade e previsibilidade. (Heavy rainfall at the city of Rio de Janeiro: probability and forecasting)", M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 207p, 2009.
- BARROS, V. R. "Avaliação da evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL e imagens Landsat5-TM – Estudo de Caso: bacia do rio Piabanha/RJ. (Evaluation of evapotranspiration using the algorithm SEBAL and Landsat5-TM images – Case Study: Piabanha River watershed/RJ)", M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 175p, 2012.
- BAUM B. A., PLATNICK S. "Introduction to MODIS Cloud Products." *Springer*, Berlin, Heidelberg, 2006.
- BONAVITA, M., HÓLM, E.V., ISAKSEN, L. AND FISHER, M. "The evolution
- BORBAS, E. E., SEEMANN, S., KERN, A., MOY, L., LI, J., GUMLEY, L., MENZEL W. P., "MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document." *Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies*, v.6, 2006.
- BORMANN, N., DELSOL, C., DRAGANI, R., FUENTES, M., GEER, A.J.,

- BRAGA, R. N. D. S., HORA, M. D. A. G. M., LYRA, G. B.; NASCENTES, A. L. “Determination and interpolation of intense rainfall equation coefficients for the city of Rio de Janeiro.” *Revista Ambiente & Água*, v. 13, n. 1, 2018.
- BRASILIENSE, C. S., DERECKYNSKI, C. P., SATYAMURTY, P., CHOU, S. C., RANDER, V. S. S., CALADO, R. N. “Synoptic analysis of an intense rainfall event in Paraíba do Sul river basin in southeast Brazil.” *Royal Meteorological Society, Meteorol. Appl.*, v. 25, pp. 66–77, 2018. Disponível em: doi: 10.1002/met.1670.
- BRITO, T. T., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., LYRA, G. B., GOIS, G., ZERI, M. “Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil.” *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2016. Disponível em: doi: 10.1007/s00703-016-0481-x.
- BROOKS, H. E., ANDERSON, A. R. “Climatological aspects of convective parameters from the NCAR/NCEP Reanalysis.” Preprints, 22nd Conf. Severe Local Storms, Hyannis, EUA, *Amer. Met. Soc.*, 2004.
- BUNTOUNG, S., JANJAI, S., NUNEZ, M., PATTARAPANITCHAI, S., NIMNUAN, P., PARIYOTHON, J. “Spatial and temporal changes of precipitable water vapour in Thailand.” *Physical Geography*, pp.1–22. Disponível em: doi:10.1080/02723646.2019.1710433.
- BUSCH, A., AMORIM, S. N. D. “A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro em 2011: procurando respostas.” *ENAP Casoteca de Gestão Pública*, 2011.
- CAMPONOGARA, G. “Extremos de precipitação diária em Belém, Pará, e estrutura vertical da atmosfera.” *Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo*, 2012.
- CHRYSOULAKIS, N., SPILIOPOULOS, M., DOMENIKIOTIS, C., DALEZIOS, N. “Towards monitoring of regional atmospheric instability through MODIS/Aqua images.” *Proceedings of the International Symposium held at Volos*, November, 2003.
- COAKLEY, J. A., BRETHERTON, F.P., “Cloud cover from high resolution scanner data: detecting and allowing for partial fields of view”, *Journal of Geophysical Research*, v. 87, n. C7, pp. 4917-4932, 1982.
- DA COSTA, S. S., RODRIGUES, J. V., GONÇALVES, W. A., DE SOUZA, R. A. F. “Performance of sounding retrievals from AIRS, GOES10, MODIS and HIRS Radiances during Mini-Barca campaign–June 2008.” *XIV-Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100003>.

Dados sobre Desastres Naturais no Brasil coletados pelo Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres (EM-DAT, 2020). Disponível em: <https://public.emdat.be/data>.

data assimilation system.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*

DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., BERRISFORD, P., POLI, P., KOBAYASHI, S. “The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. v.137, n. 656, pp. 553–597, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.828>.

DEE, D.P., UPPALA, S.M., SIMMONS, A.J., BERRISFORD, P., POLI, P.,

DEL CARMEN, J. Q. M., CERVANTES, D. R., FUNES, R. R., BARÓN, C. S. A., DE JESÚS, G. R. F., HERNÁNDEZ, T. S., FERNÁNDEZ, M. J. I. “Impact of “The Blob” and “El Niño” in the SW Baja California Peninsula: Plankton and Environmental Variability of Bahia Magdalena.” *Frontiers In Marine Science*, n. 6, 2019.

DERECZYNSKI, C. P., OLIVEIRA, J. S. D., MACHADO, C. O. “Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro.” *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24(1), pp. 24-38, 2009.

DI NATALE, G., BIANCHINI, G., DEL GUASTA, M., RIDOLFI, M., MAESTRI, T., COSSICH, W., MARGUNO, D., PALCHETTI, L. “Characterization of the Far Infrared Properties and Radiative Forcing of Antarctic Ice and Water Clouds Exploiting the Spectrometer-LiDAR Synergy.” *Remote Sensing*, v. 12, ed. 3574, 2020.

DOSWELL, C. A., III. “The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example”. *Weather and Forecasting*, v. 2, pp. 316, 1987.

EMANUEL, K. A. *Atmospheric Convection*. USA, Oxford University Press, 1994.

ENTRALGO, T., FREDY, J. "Análise espacial e estatística dos movimentos de massa deflagrados pelas chuvas dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011 na região serrana do estado do Rio de Janeiro, Brasil." M. Sc. Dissertation, 99p, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the

ERMIDA, S. L., SOARES, P., MANTAS, V., GOTTSCHÉ, F. M., TRIGO, I. F. “Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the

- Landsat Series.” *Remote Sensing Journal*, v. 12, n. 1471, 2020. Disponível em: doi:10.3390/rs12091471.
- Estudo de Proteção e Defesa Civil elaborado pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, 2018. Disponível em: <https://www.cnm.org.br/cms/biblioteca/documentos/Decretacoes-de-anormalidades-causadas-por-desastres-nos-Municipios-Brasileiros-10-10-2018-v2.pdf>.
- FENG, X., WU, B., YAN, N. “A Method for Deriving the Boundary Layer Mixing Height from MODIS Atmospheric Profile Data”. *Atmosphere*, v. 6, pp. 1346-1361, 2015.
- FOSS, M. “Condições atmosféricas conducentes à ocorrência de tempestades convectivas severas na América do Sul.” *Dissertation, Federal University of Santa Maria*, 2011.
- GALWAY, J. “The lifted index as a predictor of latent instability.” *Bull American Meteorological Soc.* v. 37, pp. 528–529, 1956.
- GELARO, R., MCCARTY, W., SUÁREZ, M. J., TODLING, R., MOLOD, A., TAKACS, L. “The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2).” *Journal of Climate*, v.30, n. 14, pp. 5419–5454, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.
- GEORGE, J. J. “Weather forecasting for aeronautics.” *Academic Press*, USA. 1960.
- GILLE, F. S. S., MOTA, M. A. S. “Importância das condições termodinâmicas nos eventos extremos de precipitação na cidade de Belém e região metropolitana.” *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2014.
- GILLHAM, R. W. "The capillary fringe and its effect on water-table response." *Journal of Hydrology*, v. 67, n. 1-4, pp. 307-324, 1984.
- GOMES, J. B. “Modelagem da radiação líquida via sensoriamento remoto aplicada à estimativa da evapotranspiração – estudo de caso para as condições amazônicas. (Modeling of net radiation using remote sensing applied to the estimation of evapotranspiration – case study for amazonian conditions)”, M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 203p, 2014.
- GUERREIRO, M. G. “Mapeamento automático de cicatrizes de deslizamento em regiões montanhosas (Automatic mapping of landslides scars in mountain regions)”, M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 182p, 2013.
- GUIMARÃES, J. M. “Circulações locais na região metropolitana do Rio de Janeiro: aspectos observacionais com base na análise de séries espaço-temporais. (Local

- circulations in the metropolitan region of Rio de Janeiro: observational aspects based on the analysis of spatio-temporal series)”, M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 138p, 2014.
- GUO, M., WANG, X., LI, J., YI, K., ZHONG, G., TANI, H. “Assessment of Global Carbon Dioxide Concentration Using MODIS and GOSAT Data.” *Sensors*, v. 12, pp. 16368-16389, 2012.
- GUPTA, H. V., KLING, H., YILMAZ, K. K., AND MARTINEZ, G. F.: “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling”, *Journal of Hydrology*, v.377, pp.80–91, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- HAIMBERGER, L., HEALY, S.B., HERSBACH, H., HÓLM, E.V., ISAKSEN, HALLAK R., FILHO A. J. P. “Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos na mesoescala na região metropolitana de São Paulo entre 28 de Janeiro e 04 de Fevereiro de 2004.” *Revista Brasileira de Meteorologia*, pp.173–206, 2012.
- HARADA, Y., KAMAHORI, H., KOBAYASHI, C., ENDO, H., KOBAYASHI, S., OTA, Y. “The JRA-55 reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability.” *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, v. 94 n. 3, pp. 269–302, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2151/jmsj.2016-015>.
- HARTMANN, D. L., RAMANATHAN, V., BERROIR, A., HUNT, G. E. “Earth radiation budget data and climate research.” *Reviews of Geophysics*, v. 24, n. 2, pp. 439-468, 1986.
- HENRY, N. L. “A static stability index for low-topped convection.” *Weather Forecast*, n. 15, pp. 246–265, 1999.
- HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., THÉPAUT, J. N. “The ERA5 global reanalysis.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.146(730), pp. 1999-2049, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., THÉPAUT, J. N. “The ERA5 global reanalysis.” *Royal Meteorological Society*, v.146, pp.1999–2049, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- HOCHLEITNER, F. R. “Análise de técnicas de mascaramento de nuvens para estimativa de parâmetros físicos da superfície do mar via dados AVHR-NOAA (Analysis of

- methodologies for cloud masking in determination of sea surface temperature via meteorological satellites)", M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 87p, 2007.
- HUANG, J., YIN, J., WANG, M., HE, Q., GUO, J., ZHANG, J. "Evaluation of five reanalysis products with radiosonde observations over the Central Taklimakan Desert during summer." *Earth and Space Science*, v.8, e2021EA001707. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2021EA001707>.
- JIANG, J., ZHOU, T., ZHANG, W. "Evaluation of satellite and reanalysis precipitable water vapor data sets against radiosonde observations in central Asia." *Earth and Space Science*, v.6, pp.1129–1148, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019EA000654>.
- JUNPEN, A., GARIVAIT, S., BONNET, S. "Estimating emissions from forest fires in Thailand using MODIS active fire product and country specific data." *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, v. 49, n. 3, pp. 389-400, 2013.
- KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L. "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project." *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, n. 3, pp. 437–471, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/1520-0477>.
- KOBAYASHI, S., ANDRAE, U., BALMASEDA, M.A., BALSAMO, G., BAUER, KURSINSKI, E. R., HAJJ, G. A., SCHOFIELD, J. T., LIENFIELD, R. P., HARDY, K. R. "Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System." *Journal of Geophysical Research*, v. 102, n. d19, pp. 23429-23465, 1997.
- L., KÅLLBERG, P., KÖHLER, M., MATRICARDI, M., MCNALLY, A.P., LAZZARA, M. A., KELLER, L. M., STEARNS, C. R., THOM, J. E., WEIDNER, G. A. "Antarctic satellite meteorology: applications for weather forecasting." *Monthly Weather Review*, v. 131, n. 2, pp. 371-383, 2003.
- LEVIZZANI, V. "Satellite rainfall estimates: new perspectives for meteorology and climate from the EURAINSAT project." *Annals of Geophysics*, v. 46, n. 2, 2003.
- LI, R., LI, H., SUN, L., YANG, Y., HU, T., BIAN, Z., CAO, B., DU, Y., LIU, Q. "An operational split-window algorithm for retrieving 3 land surface temperature from geostationary satellite 4 data: A case study on Himawari-8 AHI data." *Remote Sensing Journal*, 2020.

- LILJAS, E., “Automated recognition of cloud types from satellites and its application to nowcasting”. *International Conference on Agrometeorology*, Fondazione Cesena Agricoltura Publicatione, 1987.
- LIMA, D. R. O. “Diagnóstico de chuvas e previsão meteorológica para a bacia hidrográfica do rio Manso. (Rain diagnostics and meteorological forecasting at the Manso river watershed)”, M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 185p, 2005.
- LIU, Z., LIU, Q., LIN, H. C., SCHWARTZ, C. S., LEE, Y. H., & WANG, T. “Three-dimensional variational assimilation of MODIS aerosol optical depth: Implementation and application to a dust storm over East Asia.” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D23), 2011.
- LOPES, A. F. M. “Avaliação da chuva em episódios de ZCAS na Região Sudeste do Brasil - estudo de caso: bacia do rio Grande (Rainfall impact of episodes ZCAS in the southeast region of Brazil – case study: rio Grande river watershed)”, M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 130p, 2016.
- LUCENA, A. J. “A ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro (The heat island in the metropolitan area of Rio de Janeiro).” D. Sc. Thesis, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 473p, 2012.
- MAEDA, E. E., FORMAGGIO, A. R., SHIMABUKURO, Y. E., ARCOVERDE, G. F. B., HANSEN, M. C. “Predicting forest fire in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and artificial neural networks.” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 11, n. 4, pp. 265-272, 2009.
- MAESTRI, T., COSSICH, W., SBROLLI, I. “Cloud identification and classification from high spectral resolution data in the far infrared and mid-infrared.” *Atmospheric Measurement Techniques*, v.12, pp. 3521–3540, 2019.
- MARENGO, J. A., JONES, R., ALVES, L. M. et al. “Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system”. *International Journal of Climatology*, v. 29, pp. 2241–2255, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.1863>.
- MARGUNO, D., COSSICH, W., MAESTRI, T., BANTGES, R., BRINDLEY, H., FOX, S., OETJEN, H. “Cirrus Cloud Identification from Airborne Far-Infrared and Mid-Infrared Spectra.” *Remote Sensing*, v.12, ed. 2097, 2020.

- MEDEIROS, V. S., BARROS, M. "Análise de eventos críticos de precipitação ocorridos na região serrana do estado do Rio de Janeiro nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011." *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2011.
- MILLER, R. "Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central", 1972.
- MINERVINO, A. C.; DUARTE, E. C. "Danos materiais causados à Saúde Pública e à sociedade decorrentes de inundações e enxurradas no Brasil, 2010-2014: dados originados dos sistemas de informação global e nacional." *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 21, pp. 685-694, 2016.
- MONGE-SANZ, B.M., MORCRETTE, J.-J., PARK, B.-K., PEUBEY, C., DE MOREIRA, D. S., SILVA DIAS, P. L. SILVA DIAS, M. A. F. "Controle operacional de qualidade dos dados de METAR e SYNOP." *Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu/PR, Soc. Bras. Meteorologia, em mídia digital*, 2002.
- MOTA, M. A. S., NOBRE, C. A. "Relação da variabilidade da energia potencial convectiva disponível (CAPE) com a precipitação e a alta da Bolívia durante a campanha Wet-AMC/LBA." *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, n. 3b, pp. 344-355, 2006.
- MOURA, C. R., ESCOBAR, G. C. J., ANDRADE, K. M. "Padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na Região Metropolitana do Rio de Janeiro." *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.28, n.3, pp. 267 - 280, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300004>.
- NASCIMENTO, E. L., "Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil?" *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 20, n. 1, 2005.
- NICÁCIO, R. N. "Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco (Actual evapotranspiration and soil moisture using orbital sensors dataset and the SEBAL methodology in the São Francisco basin)", D. Sc. Thesis, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 337p, 2008.
- of the ECMWF hybrid data assimilation system." *Quarterly*
- OKE, T.R. "Surface climate processes". In: Bailey, W.G., Oke, T.R., Rouse, W.R. (eds), *Surface climates of Canada*, chapter 4, Montreal, McGill-Queen's University Press, 1997.

- OKE, T.R. “The distinction between canopy and boundary-layer heat islands”. *Atmosphere*, v. 14, pp. 268–277, 1976.
- OLIVEIRA, N. S. “Relação entre chuva e deslizamento em Nova Friburgo/RJ. (Correlation between rain and landslide in Nova Friburgo/RJ)”, M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 171p, 2014.
- PACE, G., MELONI, D., DI SARRA, A. “Forest fire aerosol over the Mediterranean basin during summer 2003.” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 11, n. 21, 2005.
- PIELKE, R.A., AVISSAR, R. “Influence of landscape structure on local and regional climate”, *Landscape Ecology*, v. 4, n. 3-3, pp 133-155, 1990.
- PRISTO, M. V., DEREZYNSKI, C. P., SOUZA, P. R., MENEZES, W. F. “Climatologia de Chuvas Intensas no Município do Rio de Janeiro.” *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 4, p. 615-630, 2018.
- QUADRO, M. F. L., DIAS, M. A. F. S., HERDIES, D. L. “Análise de um Vórtice Ciclônico e Mesoescala Associado a ZCAS em Janeiro de 2009.” *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 3, pp. 273-287, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631320150141>.
- RAHIMZADEGAN, M., MOBASHERI, M. R. “An attempt for improving MODIS atmospheric temperature profiles products in clear sky.” *Meteorological Applications*, v. 18, pp. 181–187, 2011.
- REBELLO, E.R. G., CARVALHO, B. E. F. C, COSTA, J. A. V., FREITAS, M. A. S., CAVALCANTE, O. A. “Condições Meteorológicas das Chuvas Fortes que Atingiram a Região Serrana do Rio de Janeiro no dia 12.01.2011”. *Congresso Brasileiro sobre Desastres Naturais*, Rio Claro (SP), 2012.
- REBELLO, V. P. A., A. C. V. GETIRANA, V. LAKSHIMI, AND O. C. ROTUNNO FILHO. “Monitoring drought in Brazil by remote sensing”. *Chapter 20. In: Venkat Lakshmi (ed.), Remote Sensing of Hydrological Extremes, Springer International Publishing Switzerland*, pp. 197-218, 251p, 2016.
- REIS, J. S., GONÇALVES, A.W. “Análise sinótica da tempestade tropical IBA”. *XVIII Simpósio de Climatologia*, 2019. Disponível em: 10.13140/RG.2.2.18002.89288.
- Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>.

- REMER, L. A., TANRE, D., KAUFMAN, Y. J., ICHOKU, C., MATTOO, S., LEVY, R., MARTINS, J. V. “Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean.” *Geophysical research letters*, v. 29, n. 12, MOD3-1, 2002.
- ROSNAY, P., TAVOLATO, C., THÉPAUT, J.-N. AND VITART, F. “The SAHA, S., MOORTHY, S., PAN, H.-L., WU, X., WANG, J., NADIGA, S. The NCEP “Climate Forecast System Reanalysis.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 91, n. 8, pp. 1015–1058, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.
- SARAIVA, J. M. B., CAMPOS, C. R. J., SALDANHA, R. “Previsão e monitoramento do tempo para a área de cobertura da CEEE utilizando o modelo RAMS.” *Bol. Soc. Bras. Meteor.*, v. 27, p. 19-26, 2003.
- SEABRA, M. S. “Estudo sobre a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul em bacias hidrográficas nas regiões Sudeste e Centro-oeste do Brasil. (Study about the influence of the South Atlantic Convergence Zone on watersheds located at the brazilian south-east and central-west regions)”, M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 125p, 2004.
- SEEMANN, S. W., BORBAS, E. E., KNUTESON, B., WEISZ, E., HUANG, H., LI, J., MENZEL, W. P. “A global infrared surface emissivity database for clear sky atmospheric sounding retrievals from satellite-based radiance measurements.” *AGU Fall Meeting Abstracts*, v. 2006, pp. A21D-0849, 2006.
- SEEMANN, S. W., MENZEL, P. W., GUMLEY, L. E. “Operational Retrieval of Atmospheric Temperature, Moisture, and Ozone from MODIS Infrared Radiances.” *Journal of Applied Meteorology*, v.42, pp. 1072-1091, 2003.
- SEKERTEKIN, A., BONAFONI, S. “Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation.” *Remote Sensing Journal*, v. 12, n. 294, 2020. Disponível em: doi:10.3390/rs12020294.
- SELUCHI, M. E., BEU, C. M. B., ANDRADE, K. M. “Características das frentes frias com potencial para provocar chuvas intensas na região serrana do Rio de Janeiro”, *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 18, p. 361-376, 2016.
- SHIMABUKURO, Y. E., DUARTE, V., ARAI, E., FREITAS, R. M., LIMA, A., VALERIANO, D. M., MALDONADO, M. L. R. “Fraction images derived from Terra Modis data for mapping burnt areas in Brazilian Amazonia.” *International Journal of Remote Sensing*, v. 30, n. 6, pp. 1537-1546, 2009.

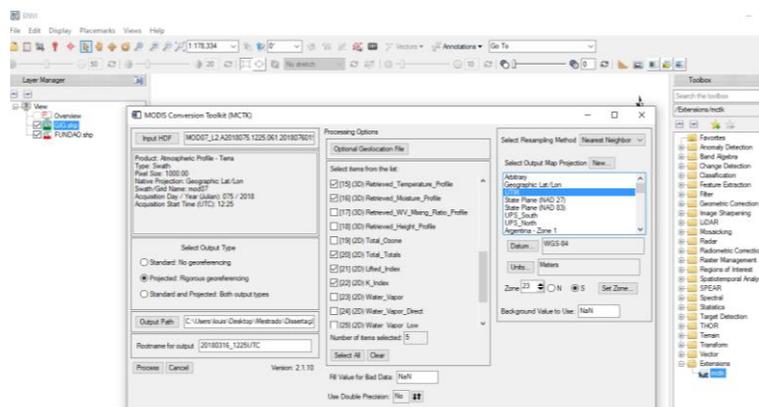
- SILVA, A. G. L. “Análise da paisagem com suporte de geotecnologia como subsídio para a gestão urbano-hídrica – estudo de caso: bacia do rio Piabanha/RJ (Landscape analysis using geotechnology as subsidy to urban and water management - case study: Piabanha river watershed/RJ)”, M. Sc. Dissertation, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 203p, 2014.
- SILVA, F. P. “Previsão de tempestades severas e de transbordamentos no rio Quitandinha – Petrópolis/RJ (Severe rainfalls and overflows forecasting for Quitandinha river – Petrópolis/RJ)”, D. Sc. Thesis, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 318p, 2019.
- SILVA, F. P., O. C. ROTUNNO FILHO, M. G. A. JUSTI DA SILVA, G. D. PIRES, R. J. SAMPAIO, A. A. M., Araujo. “Observed and estimated atmospheric thermodynamic instability using radiosonde observations over the city of Rio de Janeiro, Brazil.” *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 1, pp. 1-18, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0609-2>.
- SILVA, F. P., ROTUNNO FILHO, O. C., SAMPAIO, R. J., DRAGAUD, I. C. D. A. V., DE ARAÚJO, A. A. M., DA SILVA, M. G. A. J., PIRES, G. D. “Evaluation of atmospheric thermodynamics and dynamics during heavy-rainfall and no-rainfall events in the metropolitan area of Rio de Janeiro, Brazil.” *Meteorology and Atmospheric Physics*, pp. 1-13, 2017.
- SILVA, W. L., JÚNIOR, O.A.C. “Climate extremes related with rainfall in the State of Rio de Janeiro, Brazil: a review of climatological characteristics and recorded trends.” *Natural Hazards*, v. 114, pp. 713–732, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05409-5>.
- SIQUEIRA, J. R., MARQUES, V. S. “Estudo de Caso de Sistemas Convectivos de Mesoescala Intensos Ocorridos entre os Dias 02 e 03 de janeiro de 2013 no Estado do Rio de Janeiro: Características Estruturais e Termodinâmicas”, *Anuário do Instituto de Geociências UFRJ*. v. 39, n. 2, pp. 57-76, 2016.
- SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., DUDHIA, J., GILL, D. O., BARKER, D. M., WANG, W., POWERS, J. G. “A description of the Advanced Research WRF version 3.” *NCAR Technical note-475+ STR.*, 2008.
- SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., DUDHIA, J., GILL, D. O., BARKER, D. M., WANG, W., POWERS, J. G. “A description of the Advanced Research WRF version 3.” *NCAR Technical note-475+ STR.*, 2018.

- SMITH, W. L. et al. “First sounding results from VAS-D.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 62, n. 2, p. 232-236, 1981.
- SMITH, W. L., WOOLF, H. M., JACOB, W. J. “A regression method for obtaining real-time temperature and geopotential height profiles from satellite spectrometer measurements and its application to Nimbus 3 “SIRS” observations.” *Mon. Wea. Rev.*, v.8, pp. 582-603, 1979.
- SOBRAL, B. S., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., GOIS, G., TERESSI, P. M. B., MUNIZ-JÚNIOR, J. G. R. “Variabilidade Espaço-Temporal E Interanual Da Chuva No Estado Do Rio De Janeiro.” *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 22, pp. 281 – 308, 2018.
- SOBRINO, J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ J. C., MATTAR, C., GUILLEM, S. “Evaluation of Terra/MODIS atmospheric profiles product (MOD07) over the Iberian Peninsula: a comparison with radiosonde stations.” *International Journal of Digital Earth*, n.10, pp. 771-783, 2015. Disponível em: doi: 10.1080/17538947.2014.936973.
- Society*, v.137, pp. 553–597, 2011.
- SOUZA, V. A. S., MOREIRA, D. M., ROTUNNO FILHO, O. C., RUDKE, A. P. “Extreme rainfall events in Amazonia: The Madeira river basin.” *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100316>.
- STEPHENS, D. B. “Vadose Zone Hydrology”. Lewis Publishers, 1995.
- SU, Z. “The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Katlenburg – Lindau, v.6, n.1, pp.85-99, 2002.
- TAVARES, C. D. M. G., DE OLIVEIRA, T. A., FERREIRA, C. D. C. M. “Comportamento Espacial Das Precipitações: Estudo De Caso Dos Eventos De 11 E 12 De Janeiro De 2011 E Suas Repercussões Espaciais Na Região Serrana Do Estado Do Rio De Janeiro”, *XII Seminário do PPGE – UFJF*, 2019
- THIERMANN, V., RUPRECHT, E. “A method for the detection of clouds using AVHRR infrared observations”, *Journal of Remote Sensing*, v. 13, pp. 1829-1841, 1992.
- VADREVU, K. P., ELLICOTT, E., BADARINATH, K. V. S., VERMOTE, E. MODIS. “Derived fire characteristics and aerosol optical depth variations during the agricultural residue burning season, north India.” *Environmental pollution*, v. 159, n. 6, pp. 1560-1569, 2011.

- VÁSQUEZ, I. L. P. “Análise estocástica e identificação de padrões de variabilidade espaço-temporal da precipitação no sudeste brasileiro e Amazônia (Stochastic analysis and identification of spatio-temporal variability patterns of precipitation in southeast Brazil and Amazonia)”, D. Sc. Thesis, Civil Engineering Program, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 283p, 2018.
- VIESSMAN, W., LEWIS, G. L. “Introduction to Hydrology” Prentice Hall, 3ª Edição, 2003.
- VIRMAN, M., BISTER, M., RÄISÄNEN, J., SINCLAIR, V.A., JÄRVINEN, H. “Radiosonde comparison of ERA5 and ERA-Interim reanalysis dataset over tropical oceans”. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, v. 73, n.1, pp. 1-7, 2021. DOI: 10.1080/16000870.2021.1929752.
- WALLACE, J. M., HOBBS, P. V. “Atmospheric Science: An Introductory Survey.” *International Geophysics Series*, v. 92. University of Washington, 2006.
- WAN, Z. “New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product.” *Remote Sensing of Environment*, v. 140, pp. 36-45, 2014. Disponível em: doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027>.
- WAN, Z., DOZIER, J. “A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space.” *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 34, pp. 892-905, 1996. Disponível em: doi: <https://doi.org/10.1109/36.508406>.
- Wark, D. Q. “On indirect temperature soundings of the stratosphere from satellites.” *J. Geophys. Res.*, pp. 66-77, 1961.
- WRIGHT, R., FLYNN, L., GARBEIL, H., HARRIS, A., PILGER, E. “Automated volcanic eruption detection using MODIS.” *Remote sensing of environment*, v. 82, n. 1, pp. 135-155, 2002.
- YANG, J., DUAN, S.B., ZHANG, X., WU, P.; HUANG, C., LENG, P., GAO, M. “Evaluation of Seven Atmospheric Profiles from Reanalysis and Satellite-Derived Products: Implication for Single-Channel Land Surface Temperature Retrieval.” *Remote Sens.*, v.12, pp.791, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12050791>.

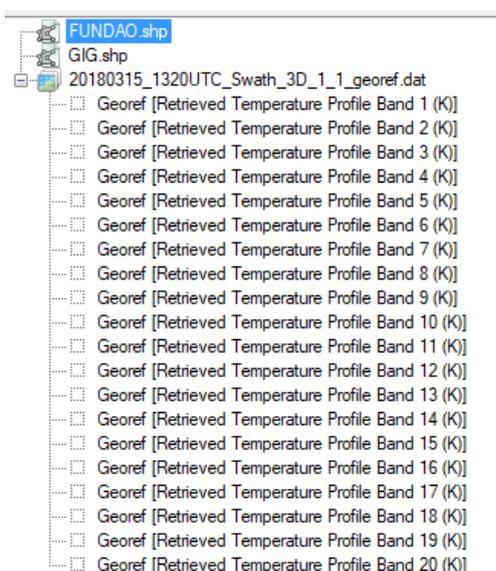
## APÊNDICE A – Extração de Dados do MODIS com a Ferramenta MCTK

Com a ferramenta MCTK, é possível ler o arquivo em HDF e selecionar as variáveis para extração e a projeção cartográfica conforme apresentado na Figura A1. Após extraída a informação, os dados são convertidos em DAT.

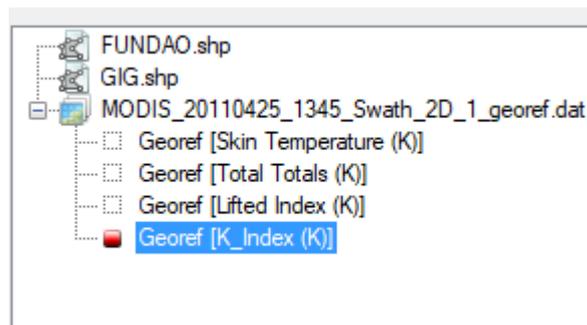


**Figura A1** – Extração e conversão dos dados HDF em DAT com a ferramenta MCTK.

Cada banda representa um nível isobárico, sendo a banda 20 relativa ao nível de 1000 hPa, a banda 19 correspondente ao nível de 950 hPa e assim por diante, até a banda 1 no nível de 5 hPa (Figura A2). Os valores dos índices TT, K e LI também são extraídos e podem ser lidos separadamente (Figura A3).

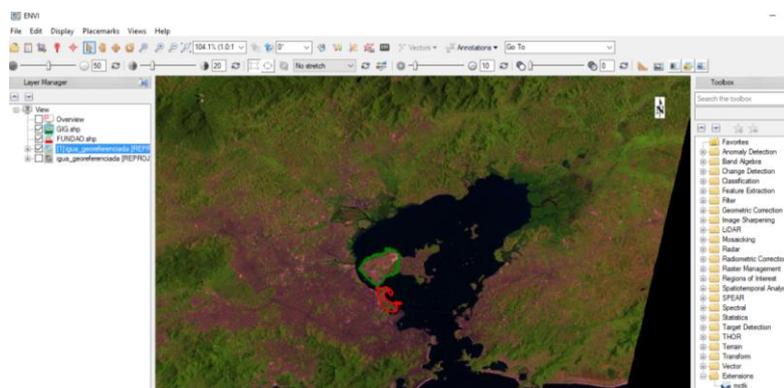


**Figura A2** – Bandas extraídas do produto do MODIS.

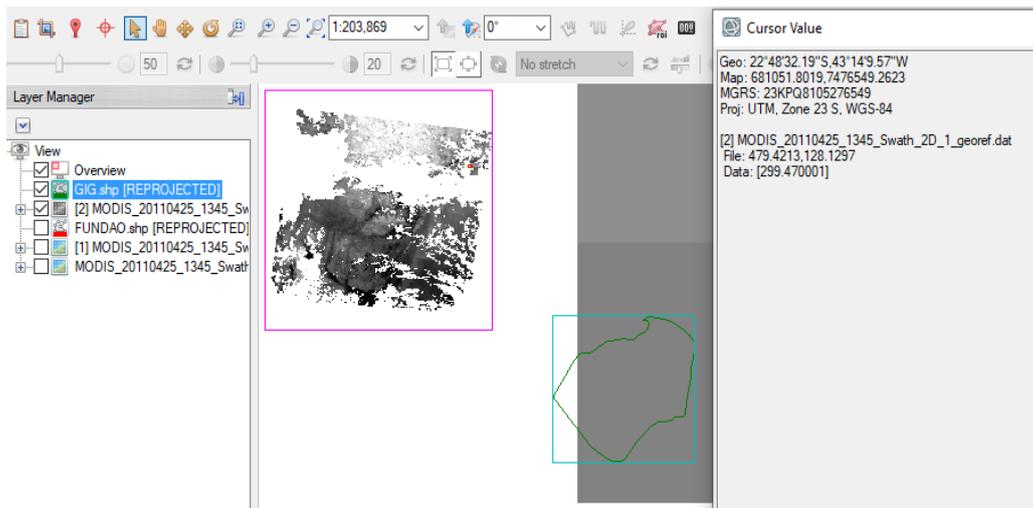


**Figura A3** – Índices de instabilidade pré-calculados do produto do MODIS.

Neste trabalho, as regiões de interesse são a Ilha do Fundão e o Aeroporto Internacional do Galeão. Logo, com o auxílio de arquivos de contorno (Figura A4), foi possível localizar os píxeis situados nessas regiões. Na medida em que a região se situou entre dois ou mais píxeis, o valor computado foi a média dos valores dos píxeis. Os valores foram lidos diretamente como mostra a Figura A5.



**Figura A4** – Região da baía de Guanabara e seu entorno, com detalhamento da Ilha do Fundão (linha de contorno em vermelho) e do aeroporto do Galeão (linha de contorno em verde).



**Figura A5** – Leitura dos valores diretamente dos píxeis sobre a região de interesse.