



UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Programa de Pós Graduação em Meteorologia (PPGM)



Departamento de
METEOROLOGIA
Universidade Federal do Rio de Janeiro

**CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE
PRECIPITAÇÃO ATRAVÉS DE DADOS DE SATÉLITE NA
REGIÃO DO OLEODUTO ORBIG, RJ**

Igor Cunha França do Amaral

Orientadora: D.Sc. Renata Libonati dos Santos

Coorientadora: D.Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

Rio de Janeiro, RJ

Março, 2021

CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO ATRAVÉS DE DADOS DE SATÉLITE NA REGIÃO DO OLEODUTO ORBIG, RJ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientadora:

D.Sc. Renata Libonati dos Santos

Coorientadora:

D.Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

Rio de Janeiro, RJ

Março, 2021

CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO ATRAVÉS DE DADOS DE SATÉLITE NA REGIÃO DO OLEODUTO ORBIG, RJ

Igor Cunha França do Amaral

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em ciências da área de Meteorologia.

Submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Mestre em Meteorologia.

Prof. Dsc. Renata Libonati dos Santos

Prof. Dsc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

Prof. Dsc. Ana Maria Bueno Nunes

Prof. Dsc. Wallace Figueiredo Menezes

Dsc. Nilton Oliveira Moraes

Rio de Janeiro, RJ

Março, 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço antes de tudo a Deus que está comigo me protegendo e me fortalecendo apesar de minhas falhas;

Agradeço muito a minha família, à minha mãe Cecília pelo carinho, apoio, presença e amor, ao meu pai pelos conselhos e orações, e ao meu irmão Alessandro por seu incentivo, pois sem eles eu nada alcançaria;

Agradeço a todos os professores que contribuíram para o meu aprendizado especializado na PPGM, em especial a professora Ana Cristina, que esteve ao meu lado em toda a minha jornada e a professora Renata pela orientação e por ter me ajudado a concluir este mestrado;

Agradeço a minha esposa Karine por seu carinho, amor e dedicação. Seu companheirismo foi fundamental na minha vida;

Agradeço aos amigos do laboratório LADSIN pelo companheirismo e suporte onde precisei crescer;

A Petrobras agradeço a bolsa de mestrado e o incentivo o qual me permitiu concluir essa etapa dando suporte e recursos.

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

CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO ATRAVÉS DE DADOS DE SATÉLITE NA REGIÃO DO OLEODUTO ORBIG, RJ

Igor Cunha França do Amaral

Março/2021

Programa de Pós-graduação em Meteorologia

RESUMO

Os oleodutos representam um importante meio de transporte na cadeia logística da Petrobras. Desde sua produção, o petróleo é transportado por oleodutos para os terminais da Transpetro e em seguida até as refinarias. Após o refino, os derivados são novamente escoados por dutos aos terminais que abastecem os mercados. Dutos podem apresentar falhas por razões naturais que podem gerar ação de movimentos de terra, e por conseguinte, ocasionar rupturas que geralmente estão associadas a grandes prejuízos, além de exigir maior tempo de reparo devido às proporções das danificações, o que atrasa o retorno da operação do duto.

Assim sendo, o presente trabalho foi motivado pela ocorrência recente de grandes prejuízos causados por chuvas intensas no estado do Rio de Janeiro e a grande importância dos oleodutos para a economia. Dando a essa dissertação o objetivo de identificar os eventos extremos de chuva, e definir os processos físicos atmosféricos atuantes, por meio do conjunto de dados multi-satélite do *Global Precipitation Measurement* (GPM), ao longo do oleoduto ORBIG, principalmente responsável pelo fornecimento de petróleo ao Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro. Para tal, utilizou-se dados de precipitação provenientes de sensoriamento remoto e dados de pluviômetros da rede de estações da Agência Nacional das Águas (ANA) para o período entre 2000 à 2019, distribuídas por toda a região do oleoduto ORBIG localizado entre os municípios de Angra dos Reis/RJ e Duque de Caxias/RJ.

Inicialmente foi feita a validação dos dados de satélite através da comparação estatística com os dados dos pluviômetros *in situ*. Depois da confirmação da eficiência, foram aplicadas técnicas estatísticas para normalização das anomalias de precipitação, de forma a permitir a realização de uma análise regional de frequência dos maiores acumulados de precipitação, como também, a obtenção de estimativas mais robustas e confiáveis de parâmetros associados às distribuições de probabilidades das intensidades de eventos chuvosos extremos. Ademais, foi avaliada a variabilidade e os extremos de precipitação ao longo da região do percurso do oleoduto ORBIG e seu entorno, e também, foram analisadas as condições meteorológicas atuantes por meio da reanálise ERA-5 e imagens de satélites disponíveis.

A validação dos dados de precipitação do produto GPM apresentou uma correlação satisfatória para com os dados observados de acumulados de precipitação mensais e semanais, sendo desta forma, considerado uma possível ferramenta alternativa na estimativa de precipitação, sobretudo, em regiões desfavorecidas de informação de chuva. Os resultados demonstram a ocorrência em Itaguaí, Seropédica e Nova Iguaçu de uma maior frequência dos extremos de chuva, enquanto sobre Angra dos Reis uma maior intensidade. Dentre os dez maiores extremos de precipitação, nove deles ocorreram durante o verão, e tendo, em sua maioria, o suporte de umidade em baixos níveis como principal contribuinte para persistência destes eventos extremos. Esses resultados contribuem para definir limiares de chuva intensa para a área de estudo, ajudando na concepção de medidas de prevenção. Além disso, fornecem o auxílio e eficiência que os dados de sensoriamento remoto podem gerar.

Palavras-chave: precipitação, dutos, climatologia, sensoriamento remoto, georiscos, Rio de Janeiro.

ABSTRACT

The pipelines represent an important means of transportation in the Petrobras System's logistics chain. From its production, oil is transported through pipelines to Transpetro terminals and then to refineries. After refining, the derivatives are again drained through pipelines to the terminals that supply the markets. Pipelines can fail due to natural-causes that can cause landslide action and, therefore, cause ruptures that are usually associated with major damage, in addition to requiring longer repair time due to the proportions of damage, which delays the return of the operation of the duct.

Therefore, the present work was motivated by the recent occurrence of great losses caused by heavy rains in the state of Rio de Janeiro and the great importance of oil pipelines for the economy. Giving this dissertation the objective of identifying the extreme rain events, and defining the atmospheric physical processes responsible, through the GPM multi-satellite data set, along the ORBIG pipeline, mainly responsible for the supply of oil to the Petrochemical Complex of Rio de Janeiro. For that, we used precipitation data from remote sensing and rainfall data from the network of stations of the National Water Agency (ANA) for the period between 2000 to 2019, distributed throughout the ORBIG pipeline region located between the municipalities of Angra dos Reis / RJ and Duque de Caxias / RJ. Initially, satellite data was validated through statistical comparison with data from in situ rain gauges. After the confirmation of efficiency, statistical techniques were applied to normalize precipitation anomalies, in order to allow the performance of a regional analysis of the frequency of the highest accumulated rainfall, as well as obtaining more robust and reliable estimates of parameters associated with the probability distributions of the intensities of extreme rainy events. Moreover, variability and precipitation extremes were assessed along the ORBIG pipeline route and its surroundings, were also analysed meteorological conditions through ERA-5 reanalysis and available satellite images.

The validation of the precipitation data of the GPM product showed a satisfactory correlation with the observed data of accumulated monthly and weekly precipitation, thus being considered a possible alternative tool in the estimation of precipitation, especially in less favored regions of rainfall information. The results demonstrate the occurrence in Itaguaí, Seropédica and Nova Iguaçu of a greater frequency of the extremes of rain, while in Angra dos Reis a greater intensity. Among the ten greatest extremes of precipitation, nine of them occurred during the summer, and having mostly humidity support at low levels as the main contributor to the persistence of these extreme events. These results contribute to defining

thresholds of intense rain for the study area, helping in the design of preventive measures. Furthermore, they provide the gain and efficiency that remote sensing data can generate.

Keywords: precipitation, pipelines, climatology, remote sensing, georisks, Rio de Janeiro.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ACRÓNIMOS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivos.....	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Medição e Estimativa da Precipitação.....	5
2.1.1 Rede Pluviométrica e Pluviográfica.....	5
2.1.2 Multi-sensores Remoto.....	6
2.2 Sistemas meteorológicos atuantes no estado do Rio de Janeiro.....	10
2.2.1 Frente Fria.....	11
2.2.1.1 Pós-Frontal (PF).....	12
2.2.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).....	12
2.2.3 Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).....	13
2.2.4 Baixa Pressão.....	13
2.3 Dutos.....	14
2.3.1 Conceitos básicos.....	14
2.3.2 Interação chuva-dutos.....	18
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA E DADOS.....	23
3.1 Região de estudo.....	24
3.2 Dados.....	24
3.2.1 GPM.....	25

3.2.2	Pluviômetros.....	25
3.2.3	Reanálise ERA-5.....	26
3.3	Metodologia.....	27
3.3.1	Validação do GPM.....	27
3.3.2	Análise de extremos diário.....	28
3.3.3	Análise de extremos de vários dias.....	30
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS		31
4.1	Validação do GPM com dados in situ.....	31
4.2	Normalização da precipitação do GPM.....	32
4.3	Análise meteorológica para os casos identificados.....	36
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....		53
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		55

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Sensores utilizados no TRMM. Fonte: NASA, 2017.....	7
Figura 2.2. Esquema do Observatório Central do GPM. Fonte: NASA, 2017.....	9
Figura 2.3. Representação da constelação de satélites do projeto GPM. Fonte: NASA, 2017.....	10
Figura 2.4. Climatologia de precipitação no Brasil durante o trimestre do verão (dezembro, janeiro e fevereiro). Fonte: CPTEC/INPE.....	11
Figura 2.5. Estrutura de um sistema frontal com as frentes fria e quente e um ciclone em superfície. Fonte: Saraiva <i>et al.</i> , 2004.....	12
Figura 2.6. Dutos da Petrobras no (a) Brasil e (b) Rio de Janeiro. Fonte: Transpetro, 2020.....	16
Figura 2.7. Ortofoto com escala de 1:8000 referente à área do duto ORBIG em Mangaratiba. Fonte: Rodrigues <i>et al.</i> , 2005.....	17
Figura 2.8. Tipos de Ruptura de Tubulação (a) por tração (b) por flambagem (c) por punção. Fonte: Sandroni, 2004.....	19
Figura 2.9. Ruptura por tração no duto OLAPA. Fonte: Soares e Musman, 2001.....	20
Figura 3.1. Localização geográfica do estado do Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil (painel superior) destacando a localização do retângulo azul da região de estudo: latitudes 22° 55 '56 "S, 23° 05 '08" S e longitudes 043° 15' 23 "W, 044° 35 '19" W. O painel inferior descreve a região de estudo, o oleoduto ORBIG (linha vermelha), os pontos da grade (tracejado quadrados) do conjunto de dados do GPM e a localização das estações pluviométricas.	24
Figura 4.1. (a) Correlação de Spearman para acumulado semanal de precipitação entre estações locais e hidroestimador GPM. (b) Correlação de Spearman para acumulado mensal de precipitação entre estações locais e hidroestimador GPM.....	32
Figura 4.2. (a) Acumulado de precipitação diária (em cores e linhas de contorno preto - mm.dia ⁻¹) e (b) anomalia de precipitação diária padronizada (em cores e linhas de contorno preto), para o dia 05/01/2008. As linhas vermelhas representam as transmissões do oleoduto.....	38
Figura 4.3. Imagens do satélite GOES-10 (a) canal 3 (vapor d'água) (b) canal do infravermelho (realçado), do dia 05/01/2008 às 23:15 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.....	38
Figura 4.4. (a) Campo de Umidade específica (g/kg) em escala de cores e vento em 850 hPa em linhas de corrente (m/s) (b) Pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas sólidas pretas,	

com altura geopotencial em 500 hPa ($\text{mgp}\cdot 10^{-1}$) em linhas tracejadas em verde e magnitude do vento em 200 hPa (m/s) em escala de cores. Campos do ERA-5 para o dia 05/01/2008 às 18:00 UTC.....	39
Figura 4.5. (a) Campo de divergência do vento em 300 hPa ($10^{-6}\cdot\text{s}^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 300 hPa em linhas de corrente (b) Campo de divergência do vento em 850 hPa ($10^{-6}\cdot\text{s}^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 850 hPa em linhas de corrente. Campos do ERA-5 para o dia 05/01/2008 às 18:00 UTC.....	39
Figura 4.6. (a) Acumulado de precipitação diária (em cores e linhas de contorno preto - $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) e (b) anomalia de precipitação diária padronizada (em cores e linhas de contorno preto), para o dia 03/02/2008. As linhas vermelhas representam as transmissões do oleoduto.....	41
Figura 4.7. Imagens do satélite GOES-10 (a) canal 3 (vapor d'água) (b) canal do infravermelho (realçado), do dia 03/02/2008 às 00:00 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.....	42
Figura 4.8. (a) Campo de Umidade específica (g/kg) em escala de cores e vento em 850 hPa em linhas de corrente (m/s) (b) Pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas contínuas pretas, com altura geopotencial em 500 hPa ($\text{mgp}\cdot 10^{-1}$) em linhas tracejadas em verde e magnitude do vento em 200 hPa (m/s) em escala de cores. Campos do ERA-5 para o dia 03/02/2008 às 18:00 UTC.....	42
Figura 4.9. (a) Campo de divergência do vento em 300 hPa ($10^{-6}\cdot\text{s}^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 300 hPa em linhas de corrente (b) Campo de divergência do vento em 850 hPa ($10^{-6}\cdot\text{s}^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 850 hPa em linhas de corrente. Campos do ERA-5 para o dia 03/02/2008 às 18:00 UTC.....	43
Figura 4.10. (a) Acumulado de precipitação diária (em cores e linhas de contorno preto - $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) e (b) anomalia de precipitação diária padronizada (em cores e linhas de contorno preto), para o dia 29/03/2001. As linhas vermelhas representam as transmissões do oleoduto.....	44
Figura 4.11. Imagem do satélite NOAA-14 canal 3 (vapor d'água), do dia 29/03/2001 às 07:48 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.....	45
Figura 4.12. (a) Campo de Umidade específica (g/kg) em escala de cores e vento em 850 hPa em linhas de corrente (m/s) (b) Pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas contínuas pretas, com altura geopotencial em 500 hPa ($\text{mgp}\cdot 10^{-1}$) em linhas tracejadas em verde e magnitude do vento em 200 hPa (m/s) em escala de cores. Campos do ERA-5 para o dia 29/03/2001 às 18:00 UTC.....	45

Figura 4.13. (a) Campo de divergência do vento em 300 hPa ($10^{-6}.s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 300 hPa em linhas de corrente (b) Campo de divergência do vento em 850 hPa ($10^{-6}.s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 850 hPa em linhas de corrente. Campos do ERA-5 para o dia 29/03/2001 às 18:00 UTC.....	46
Figura 4.14. (a) Acumulado de precipitação diária (em cores e linhas de contorno preto - mm.dia ⁻¹) e (b) anomalia de precipitação diária padronizada (em cores e linhas de contorno preto), para o dia 03/08/2018. As linhas vermelhas representam as transmissões do oleoduto.....	47
Figura 4.15. Imagem do satélite GOES-16 canal 11 (infravermelho termal), do dia 03/08/2018 às 23:45 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.....	48
Figura 4.16. (a) Campo de Umidade específica (g/kg) em escala de cores e vento em 850 hPa em linhas de corrente (m/s) (b) Pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas contínuas pretas, com altura geopotencial em 500 hPa (mgp.10 ⁻¹) em linhas tracejadas em verde e magnitude do vento em 200 hPa (m/s) em escala de cores. Campos do ERA-5 para o dia 03/08/2018 às 18:00 UTC.....	48
Figura 4.17. (a) Campo de divergência do vento em 300 hPa ($10^{-6}.s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 300 hPa em linhas de corrente (b) Campo de divergência do vento em 850 hPa ($10^{-6}.s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 850 hPa em linhas de corrente. Campos do ERA-5 para o dia 03/08/2018 às 18:00 UTC.....	49
Figura 4.18. (a) Acumulado de precipitação diária (em cores e linhas de contorno preto - mm.dia ⁻¹) e (b) anomalia de precipitação diária padronizada (em cores e linhas de contorno preto), para o dia 14/03/2010. As linhas vermelhas representam as transmissões do oleoduto.....	51
Figura 4.19. Imagens do satélite GOES-12 (a) canal 3 (vapor d'água) (b) canal do infravermelho (realçado), do dia 14/03/2010 às 23:30 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.....	51
Figura 4.20. (a) Campo de Umidade específica (g/kg) em escala de cores e vento em 850 hPa em linhas de corrente (m/s) (b) Pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas contínuas pretas, com altura geopotencial em 500 hPa (mgp.10 ⁻¹) em linhas tracejadas em verde e magnitude do vento em 200 hPa (m/s) em escala de cores. Campos do ERA-5 para o dia 14/03/2010 às 18:00 UTC.....	52

Figura 4.21. (a) Campo de divergência do vento em 300 hPa ($10^{-6}.s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 300 hPa em linhas de corrente (b) Campo de divergência do vento em 850 hPa ($10^{-6}.s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 850 hPa em linhas de corrente. Campos do ERA-5 para o dia 14/03/2010 às 18:00 UTC.....52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação de probabilidade de falha. Fonte: Michaelsen, 2011.....	18
Tabela 3.1. Estações Pluviométricas.....	26
Tabela 4.1. Os dez eventos de precipitação de maior risco.....	34
Tabela 4.2. Os dez eventos de precipitação de maior risco para acumulados de 2 a 5 dias....	35

LISTA DE ACRÓNIMOS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMSR-E Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth

AMSU-B Advanced Microwave Sounding Unit-B

ANA Agência Nacional das Águas

ANP Agência Nacional de Petróleo

ASAS Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

BP Baixa Pressão

Cb Cumulonimbus

CEMADEN Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CERES Clouds and Earth's Radiant Energy System

CFSR Climate Forecast System Reanalysis

CNES Centre National D'Études Spatiales

CPRM Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CPTEC Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

DMSP Defense Meteorological Satellite Program

DoD Department of Defense

DPR Dual-Frequency Precipitation Radar

ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ERA ECMWF ReAnalysis

ESA European Space Agency

FF Frente Fria

FGGE First GARP Global Experiment

GARP Global Atmospheric Research Program

GCOM-W1 Global Change Observation Mission 1st-Water

GMI GPM Microwave Imager

GOES Geostationary Operational Environmental Satellite

GPM Global Precipitation Measurement

HS Hemisfério Sul

IFS Integrated Forecasting System

IMERG Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM

INEA Instituto Estadual do Ambiente

INMET Instituto Nacional de Meteorologia

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

JAXA Japan Aerospace Exploration Agency

JPPS Joint Polar Satellite System

LIS Lightning Imaging Sensor

MetOp Meteorological Operational Satellite Program of Europe

MHS Microwave Humidity Sounder

NASA National Aeronautics and Space Administration

NCC Soma das anomalias normalizadas

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

OMM Organização Meteorológica Mundial

PNMM Pressão ao Nível Médio do Mar

PPS Precipitation Processing System

PR Precipitation Radar

RJ Rio de Janeiro

RNCC Índice de raridade para anomalias acumuladas

SR Sensoriamento Remoto

SSM/I Special Sensor Microwave/Imager

TSDIS TRMM Science Data and Information System

TSM Temperatura da Superfície do Mar

TMI TRMM Microwave Imager

TMPA TRMM Multisatellite Precipitation Analysis

TRMM Tropical Rainfall Meteorological Mission

UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro

VIRS Visible and InfraRed Scanner

ZCAS Zona de Convergência do Atlântico Sul

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O setor petrolífero é um dos maiores e mais importantes do mundo, que vem crescendo a cada ano. Essa expansão está acompanhada de novas tecnologias e inovações. O aumento das reservas produtivas gera a necessidade de cada vez mais estratégias no transporte. Sendo o Brasil um dos maiores potenciais de petróleo no mundo, com a petrolífera brasileira Petrobras, que foi considerada em 2011 como uma das 10 maiores petroleiras mundiais, com reservas provadas de 15,1 bilhões (SCHIAVI; HOFFMAN, 2015).

A partir desta perspectiva, um estratégico modo de transporte para o país são os dutos, que são capazes de gerar melhor logística e economia. Conforme Nogueira Júnior e Marques (1998), uma das formas mais seguras e econômicas para transporte de petróleo e seus derivados é o modo dutoviário. Os dutos podem distribuir dia e noite, conectando regiões produtoras a refinarias e aos consumidores, de uma forma mais segura e menos poluente do que pelo tráfego de automóveis, necessitando apenas de inspeções para indícios de risco (SILVA, 2015; PESSOA, 2016).

Segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP), no Brasil em 2010 já havia mais de 15 mil quilômetros de oleodutos e gasodutos (BRASIL, 2010). Muitos trechos dos dutos encontravam-se em terrenos suscetíveis a escorregamento, por exemplo, as tubulações nas Serras do Mar, na região Sul e Sudeste brasileira. Apesar das estatísticas indicarem que o modo de falha mais frequente em dutos não são os acidentes geotécnicos, são estes os que geralmente representam grandes prejuízos econômicos, sociais e ambientais.

A possibilidade de ruptura nas extensões das transmissões de dutos (oleodutos, gasodutos, polidutos, aquedutos, e outros) que cruzam regiões rurais e urbanas no estado do Rio de Janeiro podem gerar significativas consequências ao meio ambiente e à população. As tubulações podem sofrer elevado impacto decorrente de um vazamento, gerando grande complicação na sua contenção, como ocorrido em alguns acidentes anteriores (OLIVEIRA, 2005). Por exemplo, no acidente ocorrido no oleoduto ORBIG em 2005, uma forte tempestade causou um deslizamento de terra nas proximidades da região, provocando uma deformação severa ao longo do oleoduto e uma pausa no transporte do óleo (ARAÚJO; AMARAL, 2018).

O volume extremo de chuva é precursor de inúmeras consequências graves, principalmente quando a precipitação ocorre em uma região com alta densidade populacional, porque pode-se gerar danos à estrutura urbana e prejuízos econômicos. As consequências dos eventos extremos são mais intensas em áreas de urbanização precária, e muitas vezes em áreas frágeis do ponto de vista natural, tais como, encostas íngremes e planícies de inundação fluvial (MONTEIRO; ZANELLA, 2014).

Segundo André *et al.* (2008), no estado do Rio de Janeiro há distintos regimes de precipitação, presente em áreas com diferentes características morfológicas, como relevo montanhoso e/ou centros urbanos. Como exemplo de centro urbano, há as cidades de Angra dos Reis e do Rio de Janeiro, que relacionam extremos de precipitação a deslizamentos de terra e inundações.

Um dos fatores que mais preponderam sobre as regiões dos dutos é o deslocamento de massas, causado principalmente pelo extremo acúmulo pluviométrico que encharca o solo e impacta os dutos. No Rio de Janeiro, algumas regiões têm maiores acúmulos de precipitação do que outras e são mais propícias a deslizamentos e inundações, em virtude, respectivamente, de certos fatores como orografia e hidrografia e às condições geológicas. Ademais, há locais de escarpas rochosas, solo pouco espesso e áreas desmatadas, que são ambientes suscetíveis a escorregamentos de massa (DANTAS *et al.*, 2000).

Nesse âmbito, como feito por diversos autores (OLIVEIRA, 2014; SERRÃO *et al.*, 2016; SILVA, 2015; SOARES, 2006; PELLEGATTI; GALVANI, 2010; entre outros), que buscaram estabelecer uma relação entre a precipitação e os possíveis riscos para auxiliar na mitigação de acidentes. O presente trabalho busca classificar os eventos extremos de precipitação de modo a compreender os eventos espaciais e temporais de precipitação extrema.

Em geral, os eventos extremos foram classificados por meio de cálculos estatísticos aplicados nos dados de precipitação, e analisados ao longo da região com abordagem sinótica. Para obter os índices de precipitação que sirvam como indicativo de um evento extremo foi necessário informações precisas e específicas da chuva sobre a região a ser considerada. Contudo, a ausência das informações de dados observados de precipitação *in situ*, conduziu ao uso de sensoriamento remoto. Pois, para pesquisa de precipitação se faz necessário um bom conjunto de dados de longo prazo, e de alta resolução e precisão, já que a precipitação tem elevada variabilidade (DAVIS; NAGHETTINI, 2000).

Por outro lado, os estudos de mesmo âmbito demonstram que o uso de dados de sensoriamento remoto, também podem gerar resultados satisfatórios no desenvolvimento de

pesquisas (OLIVEIRA *et al.*, 2016; SATGÉ *et al.*, 2017). Sendo também usado os dados do IMERG (*Integrated Multi-SatellitE Retrievals for GPM*) para o levantamento e análise dos dados de sensoriamento remoto, e segundo Gadêlha (2018), o IMERG é um produto recente e de grande relevância para estimativa da precipitação global do GPM (*Global Precipitation Measurement*).

Portanto, para este trabalho juntou-se as informações sobre os precursores dos extremos de chuva na região do duto de transmissão ORBIG no Rio de Janeiro, buscando os locais com maior fragilidade a possíveis problemas geotécnico e a época de sua maior propensão.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo principal de estabelecer uma relação entre o maior acúmulo de precipitação e os riscos ao longo do oleoduto ORBIG. Com maior ênfase, na busca de limiares de chuva a partir do qual ocorrem desastres na região.

Este estudo buscou identificar eventos extremos de chuva para acumulados de 1, 2, 3, 4 e 5 dias para os municípios de Angra dos Reis, Mangaratiba, Itaguaí, Seropédica, Queimados, Nova Iguaçu, Belford Roxo, Duque de Caxias, para o período de 2000 a 2019. Onde foram encontrados os valores de potencial risco à tubulação devido à precipitação. Os municípios da Região da Costa Verde e Baixada Fluminense foram selecionados para este trabalho, pois são atravessados pelo oleoduto da Transpetro, transmissão ORBIG, que transporta petróleo por sua tubulação de 123 Km, passando por locais já considerados de potencial risco.

Para tal investigação, aplicou-se a metodologia que inicialmente demandou o levantamento de dados pluviométricos de alta resolução horizontal e elevada resolução temporal. A medição da chuva feita através de pluviômetros contém suas limitações por ser medida pontualmente, e com distâncias em postos de uma rede pluviométrica entre 25 e 30 km, em terreno plano, e metade dessa distância (12,5 a 15 km) em áreas montanhosas segundo a recomendação da Organização Meteorológica Mundial (OMM) (LIMA, 2015). Ressaltando que esse espaçamento pode ser ainda maior devido à ausência da estação ou de manutenção.

Optou-se neste caso por dados espaciais e temporais de chuva estimados via sensoriamento remoto através do projeto GPM, da agência americana NASA, aliado à

consolidação de base de dados de precipitação de pluviômetros para a região de estudo advinda da Agência Nacional das Águas (ANA) para o período de análise de 2000 até 2019.

Objetivando encontrar extremos de precipitação para a região da Costa Verde e Baixada Fluminense, a partir da aplicação do método de Ramos *et al.* (2017) que estabeleceu maneiras para identificar localmente acumulados de precipitação. Com o intuito de fornecer ao sistema de tubulação as regiões mais críticas de precipitação, e proporcionar informações com elevada precisão, para assim resultar em ações que visem a diminuição dos riscos de rupturas.

Com esses conhecimentos tentou-se avaliar a probabilidade de ocorrência de extremos de chuva, contribuindo para a tomada de medidas preventivas e mitigadoras aos locais de maior vulnerabilidade, e também poder estar suprindo a defasagem das estações *in situ* que contém limitações de medições principalmente em regiões de difícil acesso através dos dados hidrometeorológicos de satélite.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são feitas verificações das definições meteorológicas de precipitação e suas consequências em Angra dos Reis a Duque de Caxias, bem como as formas de medir/estimar locais de extremos de chuva. A seguir, é explicado os fatores que afetam as tubulações.

As chuvas fortes são definidas como as que registram um grande volume de água precipitada em um curto espaço de tempo. Esses regimes de precipitação, frequentemente, causam danos materiais e humanos. Para evitar prejuízos, esses riscos são estimados a partir da análise estatística de séries históricas de dados pluviográficos, através dos quais se pode estimar a intensidade e duração dos eventos (DAVIS; NAGHETTINI, 2000).

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) define um evento extremo como sendo a ocorrência de uma variável acima de um valor de referência. Um dos aspectos impactados pelos eventos extremos de precipitação são os desastres naturais, como por exemplo, o deslocamento de massas e inundações. Sendo o movimento de massa definido como o movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade (TOMINAGA *et al.*, 2009).

A chuva forte pode acarretar na erosão do solo através do impacto das gotas sobre a superfície, por meio da água que se infiltra e escoam superficialmente. Dessa maneira, os sistemas hidrológicos desenvolvem uma função relevante na compreensão de deslizamentos, por isso precisa-se entender sua dinâmica hidrológica (MONTGOMERY *et al.*, 1997).

2.1 Medição e Estimativa da Precipitação

2.1.1 Rede Pluviométrica e Pluviográfica

A compreensão do regime de precipitação começa pela obtenção de informações, por meio de medição ou estimativa. A medição do acumulado de precipitação direta pode ser realizada através de aparelhos nomeados pluviômetros, com medidas pontuais (OMM, 2011). Esse método de medição, feito por observações pluviométricas pontuais, requer uma densa rede de estações para avaliar fenômenos em escalas espaciais.

Como a precipitação tem variabilidade em pequena escala temporal e espacial, exige observações contínuas e de representação espacial adequada (KIDDER; HAAR, 1995). Além

disso, falhas nos conjuntos de dados de precipitação da rede de estações os tornam inadequados para o estudo de extremos.

Assim, técnicas de sensoriamento remoto são usadas para contornar os problemas das medições diretas, adequando-se tanto à resolução temporal e espacial quanto à sua cobertura global (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

2.1.2 Multi-sensores Remoto

Como destaque para o sensoriamento remoto há a técnica de multi-sensores, pois os produtos dos sensores usados individualmente, possuem como vantagem uma menor complexidade de processamento, porém cada técnica possui suas desvantagens e para superá-las, foram desenvolvidas técnicas para combinar os diferentes métodos de sensoriamento remoto.

O sensor remoto mais conhecido é o radar meteorológico que em comparação com um pluviômetro tem como vantagem seu maior alcance, que fornece com razoável antecipação o quantitativo de chuva que pode ocorrer. Uma de suas desvantagens é a superestimativa oriunda do seu método de detecção que por efeito Doppler estima a água nas nuvens e os cristais de gelos, e como nem toda água na nuvem é precipitada os radares tendem a superestimar (Silva *et al.*, 2009).

Outro sensor remoto é o hidroestimador, que adota o método automático, relacionando empiricamente a precipitação com a temperatura de brilho, e sendo obtida por radar a bordo no satélite. Tendo como vantagem a possibilidade de gerar taxa de precipitação em curto prazo, e desvantagem a imprecisão na área coberta por precipitação, e a falta de cobertura em caso de satélite orbital (SIQUEIRA; VILA, 2019).

Por isso, em muitas aplicações o uso de múltiplos sensores é ideal, sendo utilizado também na composição de alguns produtos e os dados de pluviômetros e radares para refinar ainda mais seus resultados (KIDD; HUFFMAN, 2011).

Um dos maiores exemplos globais de uso da técnica de multi-sensores foi o TRMM (*Tropical Rainfall Meteorological Mission*), a missão lançada pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) em 1997 para estimar a precipitação. O satélite central do TRMM continha cinco instrumentos (Figura 2.1), sendo estes: 1 - O radar de precipitação TRMM (PR), que fornece a estrutura de uma tempestade. 2 - O imageador de micro-ondas (TMI), um sensor de micro-ondas que

fornece informações da quantidade de água contida nas nuvens e a intensidade da precipitação na atmosfera sobre uma ampla área. 3 - O scanner de radiação visível e infravermelha (VIRS) fornece um indicativo de água líquida presente nas nuvens, e também junta as observações do TRMM com as coletadas por outros satélites. 4 - O sistema de nuvens e energia radiante da Terra (CERES) que monitora o balanço energético entre o Sol, a atmosfera, a superfície e as nuvens. 5 - O sensor de imageamento de raios (LIS), o aparelho programado para detectar e localizar relâmpagos na região tropical do globo.

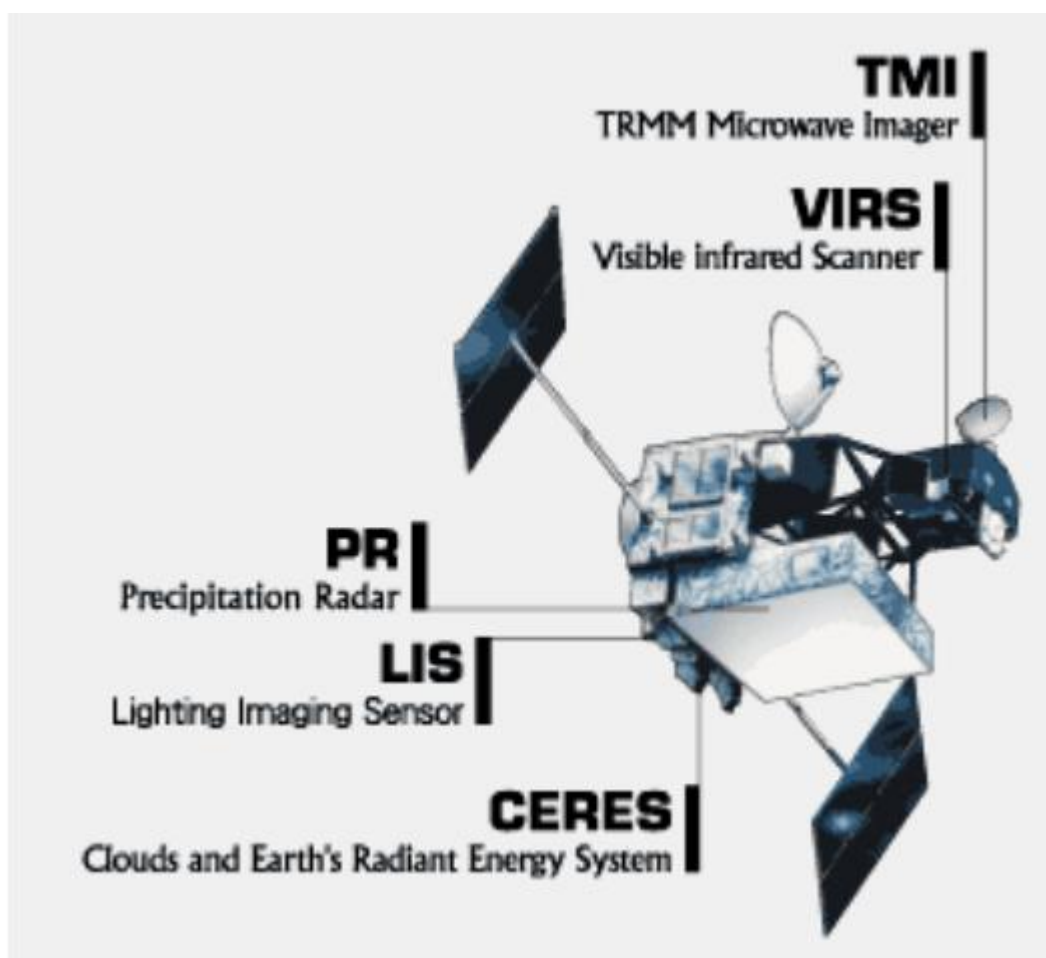


Figura 2.1 - Sensores utilizados no TRMM. Fonte: NASA, 2017.

O TMPA (Análise de Precipitação do TRMM e Multi-satélites) juntou os dados dos sensores utilizados no TRMM com os dados de vários sensores, como segue:

- O *Special Sensor Microwave/Imager* (SSM/I), um radiômetro de micro-ondas de multicanais;
- O *Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth* (AMSR-E), que fica a bordo do satélite Aqua, fornecendo medições no espectro de microondas de 6 a 85 GHz;

- O *Advanced Microwave Sounding Unit-B* (AMSU-B), instalado no satélite NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) que disponibiliza observações de microondas;

- O *Microwave Humidity Sounder* (MHS), também instalado no NOAA que fornece informações de altas frequências, entre 23,8 GHz a 190 GHz.

O TMPA também utiliza dados mensais de pluviômetros para corrigir seus dados obtidos por sensoriamento remoto (*Ground Validation*), corrigindo os dados com maiores discrepâncias (COLLISCHONN, 2006).

As agências espaciais NASA e JAXA visando aprimorar a estimativa de precipitação da missão TRMM, fizeram o lançamento do GPM, com o observatório central do GPM (Figura 2.2) que foi inaugurado em fevereiro de 2014, iniciando a transição do TRMM para o GPM e do TMPA para o IMERG (NASA, 2017). Nesse observatório está o GPM *Microwave Imager* (GMI), sensor de microondas com escaneamento cônico de multicanais, que tem a frequência de canais variando entre 10 GHz a 183 GHz e um radar de precipitação com frequência dual (DPR) com a banda Ku a 13,6 GHz e a banda Ka a 35,5 GHz (LI *et al.*, 2015).

Vale destacar que os melhores resultados obtidos dos sensores do TRMM possuíam o radar de frequência simples (apenas a banda Ku a 13,8 GHz) e a amplitude de frequência do TMI variando de 10 a 85,5 GHz (TANG *et al.*, 2016).

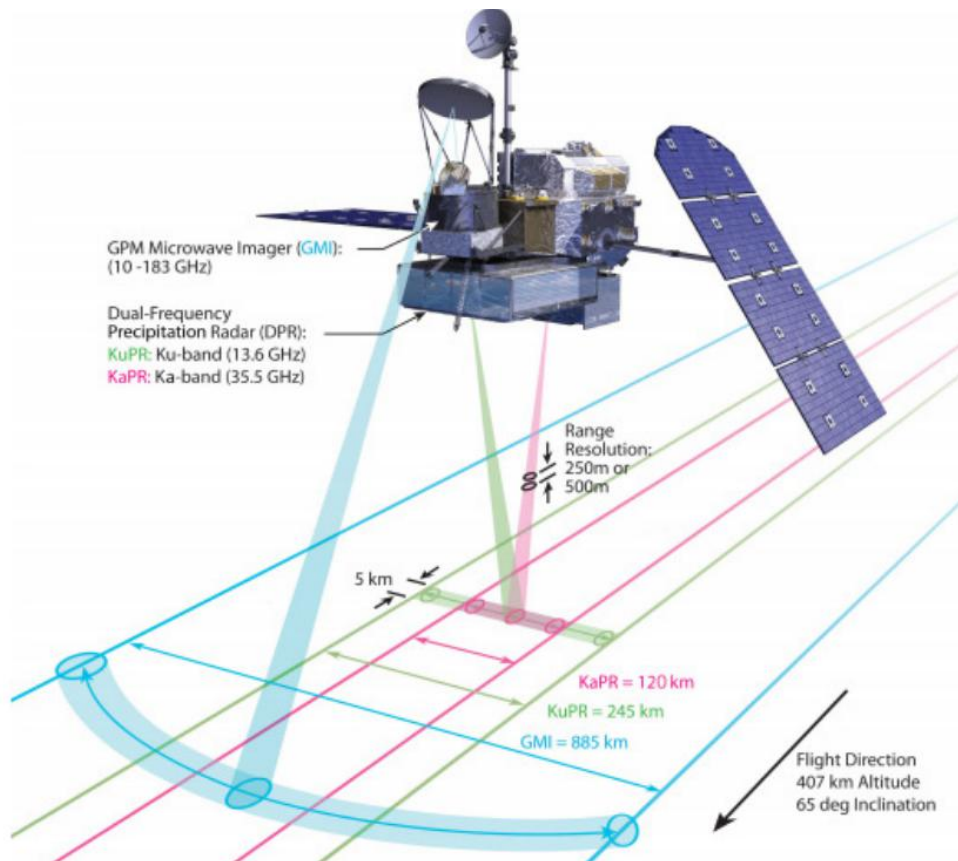


Figura 2.2 - Esquema do Observatório Central do GPM. Fonte: NASA, 2017.

Além de melhorar os sensores do observatório central, o GPM também ampliou sua rede de satélites parceiros (Figura 2.3), contando com:

- Megha-Tropiques (CNES – Centro Nacional de Estudos Espaciais - França);
- Suomi (NASA e NOAA – Estados Unidos);
- GCOM-W1 (JAXA - Japão);
- MetOp-B (ESA - Europa);
- JPSS-1 (NOAA – Estados Unidos);
- NOAA 18/19 (NOAA – Estados Unidos);
- TRMM (NASA e JAXA – Estados Unidos e Japão);
- DMSP F17/F18/F19/F20 (DoD – Estados Unidos).

O GPM com essas melhorias obteve, resolução espacial e temporal mais fina que o TRMM, gerando resolução espacial de até $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ e resolução temporal de até 30 minutos, no seu produto de melhor resolução. Além do GPM também apresentar uma inclinação orbital de 65° de Norte a Sul, enquanto o TRMM o valor de 35° .

Dos vários produtos gerados das informações dos sensores remotos, a NASA os subdivide em níveis, onde os primeiros a serem disponibilizados são os mais brutos e os últimos são os mais refinados. Os produtos do nível 3 são melhorados pelo algoritmo IMERG, que faz uma calibração entre os sensores, os mesclam, e os interpolam para todas as estimativas de micro-ondas da constelação de satélites do GPM.

O dado tratado por IMERG fica disponibilizado até 6 horas após a captura das informações pelos satélites. Ademais, o produto liberado em menor tempo é nomeado de *Early Run* (rodada recente), e passadas mais 12 horas, é lançado o *Late Run* (rodada tardia), produto com a mesma função do primeiro, porém com mais tratamentos empregados.

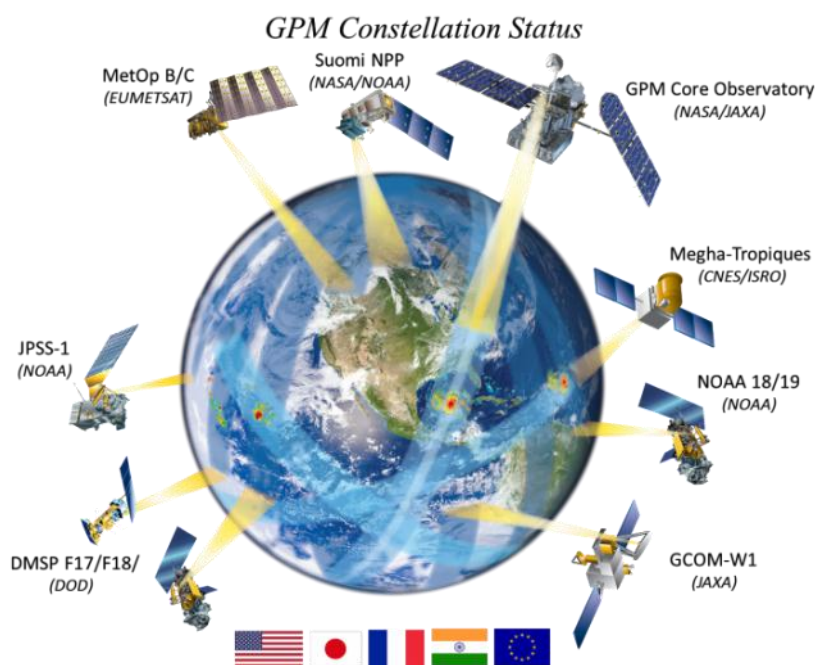


Figura 2.3 – Representação da constelação de satélites do projeto GPM. Fonte: NASA, 2017.

2.2 Sistemas meteorológicos atuantes no Estado do Rio de Janeiro

Além do conhecimento das ferramentas de obtenção de dados de precipitação, outro fator preponderante são as informações climatológicas para a região do Estado do Rio de Janeiro. De forma geral, a região é caracterizada por um padrão chuvoso com destaque para o período do verão e para as regiões montanhosas (Figura 2.4).

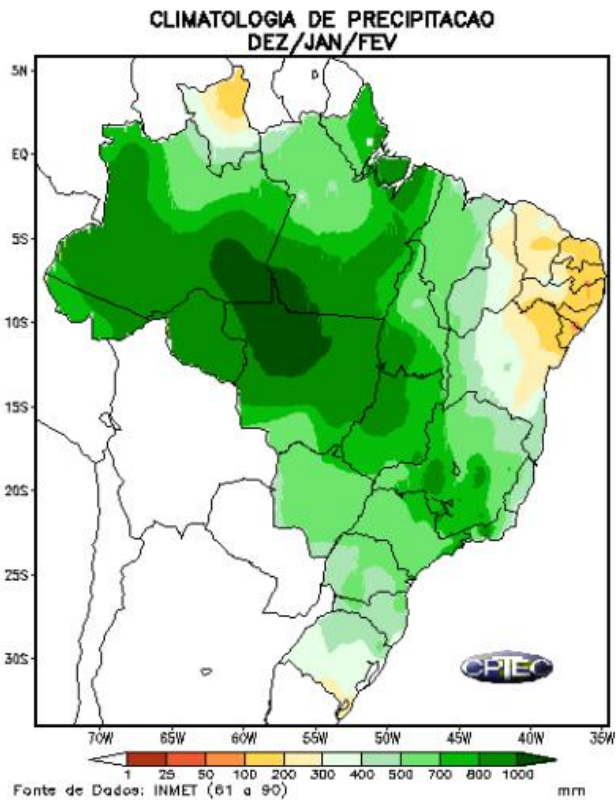


Figura 2.4 – Climatologia de precipitação no Brasil durante o trimestre do verão (dezembro, janeiro e fevereiro).

Fonte: CPTEC/INPE.

Os sistemas meteorológicos de escala sinótica que mais influenciam na variabilidade do regime de precipitação no Rio de Janeiro são: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a frente fria (FF), a baixa pressão, e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Vale destacar que o regime de precipitação também é modulado por sistemas atmosféricos de menor escala, como as linhas de instabilidade, as tempestades, as brisas, entre outros. Entretanto, nesta dissertação serão abordados apenas os sistemas de grande escala.

2.2.1 Frente Fria

Uma frente fria é caracterizada pelo avanço de uma massa de ar frio sobre uma massa de ar quente (Figura 2.5). O ar frio, por ser mais denso, adentra a parte inferior do ar quente instável e úmido, que é menos denso, resultando no levantamento da parcela de ar, dando origem a formação de nuvens convectivas de estrutura vertical extensa, nomeadas

Cumulonimbus (Cb). Essas frentes frias afetam as regiões Sul e Sudeste do Brasil o ano todo (MARENGO *et al.*, 2003), mas podem atingir as demais regiões de forma menos frequente.

No trabalho de Seluchi *et al.* (2016), verificou-se que uma parte considerável da precipitação anual na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro foi causada pela atuação de frentes frias. A pesquisa selecionou os casos de frente fria pelas informações da reanálise CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) para o período 1998-2010 e, em seguida, validou e classificou os volumes de precipitação por meio de dados pluviométricos e sensores remotos. Os autores confirmaram que os maiores acumulados diários de chuva ocorreram nos dias quentes e úmidos. Sendo todos esses eventos associados com a atuação de chuva forte advinda das frentes frias, com impacto significativo nos locais de relevo na região de estudo.

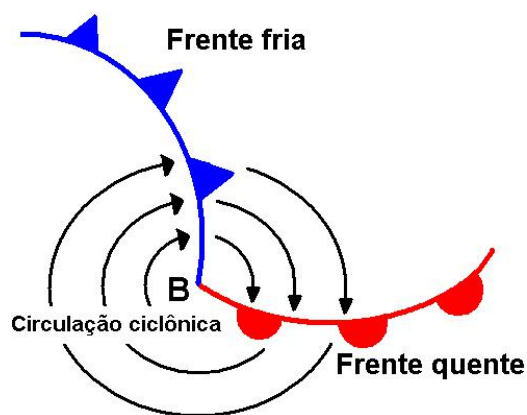


Figura 2.5 – Estrutura de um sistema frontal com as frentes fria e quente e um ciclone em superfície. Fonte: Saraiva *et al.*, 2004.

2.2.1.1 Pós-Frontal (PF)

O termo Pós-Frontal é classificado como as chuvas oriundas da passagem da frente situada na borda da massa polar, ou de um anticiclone migratório polar. São denominadas de chuva pós-frontais as chuvas resultantes da instabilidade gerada pela passagem da frente, mas que não é oriunda da frente propriamente dita. Depois da passagem da frente é comum que ocorra precipitação, muitas vezes da forma leve, oriunda de nuvens stratiformes que podem gerar cobertura total, principalmente no período de outono e inverno, segundo Galvani e Azevedo, 2003.

2.2.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A ZCAS é uma extensa banda de nebulosidade com orientação Noroeste-Sudeste que gera precipitação persistente. Na ZCAS, a frente fria que se torna estacionária, tem a função de formar um canal de convergência em baixos níveis, o que conduz a umidade da Amazônia para o Sudeste (PEREIRA; MENEZES, 2004). Além disso, o escoamento da borda oeste da ASAS contribui para a canalização do fluxo de NW-SE dentro do continente, facilitada pela imposição da Cordilheira dos Andes (CORREIA, 2013). A ZCAS tem duração média de 7 dias até 10 dias, embora a partir do quarto dia, já possa ser diagnosticada. Ela ocorre com maior frequência nos meses da primavera e do verão, quando há maior variação de temperatura, mais calor e evaporação, alimentando a convecção (CORREIA, 2013). Outro fator que favorece a formação de nuvens no período do verão é a elevação da temperatura da superfície do mar (TSM), que intensifica a precipitação da ZCAS na região oceânica e costeira (BARROS *et al.*, 2000).

Barcellos *et al.* (2016), na pesquisa sobre desastres naturais no município de Duque de Caxias no Rio de Janeiro, encontraram que dos 35 desastres ocorridos entre os anos de 1996 a 2015, 57% estavam associados à ZCAS. Também identificaram nos pluviômetros disponíveis na região que a faixa de maior frequência de acumulados diários de chuva variou entre 10 e 50 mm nas 24 h antecedentes, e entre 60 e 110 mm no dia do desastre. Com os resultados, os autores buscaram o conhecimento científico acerca da evolução espaço-temporal dos desastres para a cidade de Duque de Caxias.

2.2.3 Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS)

Um outro sistema com influência para a região de estudo, é a alta pressão localizada nos arredores da latitude de 30° sobre o oceano, nomeado de Alta Subtropical. Com circulação anti-horária no Hemisfério Sul (HS), e de grande escala na atmosfera, tem sua formação por indução da circulação das células de Hadley. Sobre o Oceano Atlântico Sul essa alta é chamada de Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Sua circulação atua no clima do Brasil o ano todo, podendo favorecer a formação de nevoeiros, ou transportar umidade do oceano para várias regiões do Brasil, incluindo as regiões Sul e Sudeste (SATYAMURTY *et al.*, 1998). Também pode favorecer a confluência de escoamentos e provocar formação de sistemas convectivos produtores de chuvas.

2.2.4 Baixa Pressão

O Sistema de Baixa Pressão é uma região que tem a pressão mais baixa em seu núcleo do que ao seu redor. Consequentemente, os ventos fluem em direção ao núcleo de baixa pressão e o ar na baixa pressão adquire movimento ascendente na atmosfera. À medida que o ar ascende, o vapor de água na massa de ar se condensa, favorecendo a formação de nuvens e precipitação. Outra característica, é que com a confluência dos ventos e do efeito Coriolis da rotação da Terra, os ventos de um sistema de baixa pressão giram no sentido anti-horário ao Norte do Equador e no sentido horário ao Sul do Equador, gerando o fluxo ciclônico (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

2.3 Dutos

2.3.1 Conceitos básicos

Dutos são estruturas, enterradas ou superficiais, utilizadas para o transporte de diversos tipos de produtos, líquidos ou gasosos, entre os pontos de produção até os consumidores. Eles podem ser destinados à transmissão ou à distribuição de produtos (ABNT, 2002).



(a)



(b)

Figura 2.6 – Dutos da Petrobras no (a) Brasil e (b) Rio de Janeiro. Fonte: Transpetro (2020).

As dutovias são transmissões lineares e superficiais, que podem se estender por centenas de quilômetros (Figura 2.6a) passando por diversas homogeneias geotécnicas, encontrando pelo caminho horizontes de solo e rochas com diferentes graus de alteração e fraturamento. Nessa variação de domínios geotécnicos, muitos processos geológicos podem pôr em risco os dutos, principalmente aqueles que atravessam regiões onde há escorregamentos de massa e processos de erosão hídrica superficial intensa muito frequentes, como exemplo a Figura 2.7.



Figura 2.7 – Ortofoto com escala de 1:8000 referente à área do duto ORBIG em Mangaratiba. Fonte: Rodrigues *et al.* (2005).

Mesmo sabendo que a ocorrência de eventos naturais (deslizamentos e inundações) se dão em virtude da associação de um conjunto de fatores, como os aspectos geomorfológicos e climáticos, Amaral (2007) verificou que no Brasil as chuvas intensas ou precedentes representa um dos fatores que causam influência na ocorrência de movimento de massa e, por conseguinte, afetam as tubulações.

Outro destaque é que na região Sudeste há uma elevada concentração de transmissões de dutos (Figura 2.6b), além de ter grande incidência de problemas de natureza geotécnica, devido ao fato de parte das tubulações estarem em áreas com declives (MICHAELSEN, 2011).

O oleoduto ORBIG, foco deste estudo, é responsável pelo transporte de óleo cru no percurso de Angra dos Reis até Campos Elíseos, o qual interliga o Terminal Aquaviário da Baía da Ilha Grande ao Terminal Terrestre de Campos Elíseos. O oleoduto ORBIG é o principal fornecedor de suprimento de petróleo para as refinarias do setor Rio-Minas e também do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro. Com capacidade operacional de movimentação anual de 32.011.200 m³/ano (CHAMBRIARD *et al.*, 2016).

De acordo com Rodrigues *et al.* (2005), o oleoduto ORBIG passa por zonas da Serra do Mar, áreas que apresentam alta probabilidade de risco à segurança, precisando de monitoramento e gestão de segurança. Pois, a obtenção de informação sobre as condições da rede dutoviária representa um papel fundamental para a segurança de dutos que transportam produtos tão perigosos.

2.3.2 Interação chuva-dutos

Os acidentes de gênese geotécnica normalmente tem origem dos elevados acúmulos de precipitação e causam muitos prejuízos por impactarem grandes trechos das dutovias, produzindo rupturas de maiores proporções, o que leva as áreas atingidas a ficarem mais expostas à danos ao meio ambiente e a população. Depois da ruptura advinda da movimentação de terra, as instalações levam um tempo maior para recomposição das operações (PORTER *et al.*, 2004).

Uma classificação de probabilidade de falha devido a georiscos foi feita por Esford *et al.* (2004), conforme representado na Tabela 2.1. Segundo os autores, no Brasil, as tubulações estão sujeitas a, principalmente, riscos de origem geotécnica ou hidrotécnica.

Causa do incidente	Porcentagem de falha
Georiscos	52,5%
Corrosão/Fadiga	15,0%
Falha humana	15,0%
Roubo/Sabotagem	10,0%
Ação de terceiros	7,5%

Tabela 2.1 - Classificação de probabilidade de falha. Fonte: Michaelsen, 2011.

Soares *et al.* (2006) apontou os escorregamentos como algumas das ocorrências com maior risco nas faixas de dutos da Transpetro. Indicando os movimentos de massa como o processo de dinâmica da superfície mais atuante. Oliveira (2005) ainda ressaltou o risco que erosões podem ter quando em áreas próximas as tubulações ocorre uma diminuição da cobertura do solo, aumentando a exposição do duto ou acrescentando carga quando se encontra na área de deposição do material erodido.

Sandroni (2004) ressaltou que o movimento do solo encharcado pode ser inclinado horizontal ou verticalmente em relação ao duto. O traçado da dutovia, por exemplo, apresenta curvaturas em sua extensão, mesmo não sendo apenas caracterizado por trechos retilíneos. Assim, as tubulações podem sofrer, respectivamente, ações de tração, flambagem e amassamento em escorregamentos (Figura 2.8).

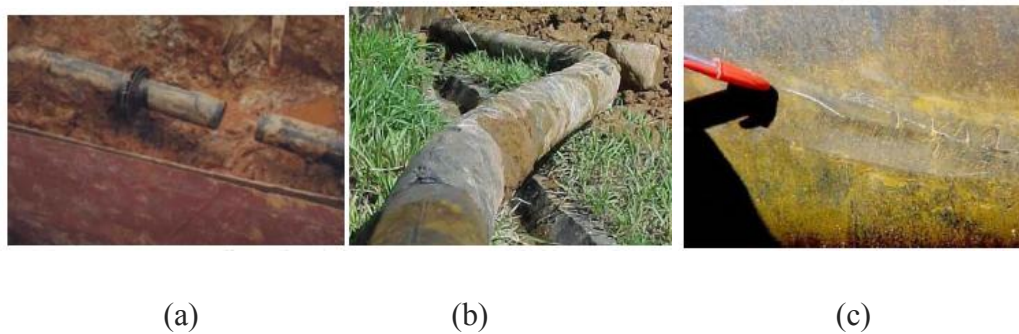


Figura 2.8 - Tipos de Ruptura de Tubulação (a) por tração (b) por flambagem (c) por puncionamento. Fonte: Sandroni (2004).

O movimento do solo é indicado como um potencial perigo observado nas faixas de dutos da Transpetro, conforme relatado por Soares *et al.* (2006), e também foi considerado um movimento de difícil identificação, que pode levar a tubulação à ruptura. Por isso, se faz necessário atividades de prevenção de falhas, conforme menciona Oliveira (2005), que têm por finalidade indicar pontos que estejam expondo a tubulação a algum risco e para que possam receber o devido tratamento.

Sandroni (2004) destacou em sua pesquisa, uma forte relação do movimento do solo com o período de chuva torrencial. Para um caso específico de chuva forte, durante cerca de 4 dias consecutivos com acumulados de 140 mm/dia, 20 mm/dia, 90 mm/dia e 80 mm/dia sequencialmente e que acabou provocando um deslocamento total de 15 cm, e ocasionando a ruptura por tração na tubulação OLAPA da Transpetro, poliduto que transporta petróleo e seus derivados entre a Refinaria Presidente Getúlio Vargas (Paraná) e o Porto de Paranaguá (Paraná), conforme a Figura 2.9.



Figura 2.9 - Ruptura por tração no duto OLAPA. Fonte: Soares e Musman (2001).

Vieira e Furtado (2004) mencionam a importância da declividade como uma variável a ser considerada para casos de deslizamentos de encostas, porém não deve ser analisada isolada das demais variáveis, principalmente sem a precipitação. Também, verificaram que ocorre mais prejuízos socioeconômicos e ambientais nas regiões de deposição do material desprendido, do que propriamente nas regiões onde ocorrem os deslizamentos e por isso, as áreas consideradas de perigo devem ser maiores do que apenas no desencadeamento, assim sendo, os totais a iniciação, o transporte e a deposição do material sólido devem ser considerados.

Gonçalves (2013) destaca que a precisa localização, a proporção e a duração dos deslizamentos são características difíceis de avaliar. No entanto, novos métodos para o mapeamento estão surgindo a partir da utilização de sensoriamento remoto. Ele usa uma metodologia para obtenção automática de locais de deslizamentos, associadas por eventos de precipitação intensa, por meio de medidas de classificação de imagens de satélite de alta resolução e por modelos de mapeamento do terreno. Constatando que, por meio desse método, é possível criar uma abordagem automática de mapeamento de deslizamentos, permitindo a confecção de bases de dados para o uso em análises de risco e suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos.

Segundo Bressani (2009) a declividade e a precipitação são fatores que influenciam o movimento de terra onde os dutos são instalados, na região litorânea na Costa Verde,

compreendida entre os municípios de Parati e Itaguaí, estado do Rio de Janeiro. Ele identificou esta região como geotecnicamente problemática por estar situada entre o mar e a Serra do Mar, sendo uma localidade que é propensa a movimentos de terra, que podem provocar prejuízos sociais e/ou econômicos.

Soares (2006) identificou a correlação entre a pluviosidade e os deslizamentos no Rio de Janeiro e concluiu ser significativa a influência das chuvas acumuladas, com destaque quando estas são elevadas. Vale ressaltar que as chuvas elevam o risco de escorregamento, mesmo na presença de chuvas fracas, porém, contínuas.

Outro exemplo foi descrito por Coutinho (2002), que teve como objetivo relacionar os escorregamentos com a precipitação ocorrida. Ele concluiu que a precipitação é um fator preponderante na movimentação de massa. Dos 16 casos de escorregamento analisados, seis deles aconteceram com chuva intensa, que registraram valor superior a 50 mm no dia do desastre e, em quatro outros casos, a precipitação superou 50% do valor médio mensal. Também foi observado, que a precipitação de 60 mm, acumulada durante 5 dias (120 horas) antes de um determinado evento verificado, foi o fator primordial para a causa do deslizamento, mesmo que a precipitação acumulada, no dia em questão, tenha sido de apenas 1,4 mm. Segundo o seu estudo, esse resultado fundamenta o argumento de que os escorregamentos estão associados não somente a chuvas torrenciais, mas também a chuvas constantes que saturam o solo, permitindo que chuvas menos intensas causem o movimento de massa.

No trabalho de D'Orsi (2011) foi utilizada uma metodologia que relaciona a precipitação pluviométrica e a deflagração de escorregamentos em taludes a montante e a jusante das pistas de rolamento, para o trecho da Serra dos Órgãos. Onde foram testadas diversas combinações entre as taxas pluviométricas acumuladas em 1h, 12h, 24h, 48h, 72h e 96h. Assim, ele identificou que a combinação que apresentou os melhores resultados para definir um limiar pluviométrico crítico foi a que dispôs a intensidade pluviométrica horária (mm/h) com um acumulado nas 24 horas antecedentes.

Soares (2006) adaptou a metodologia de Tatizana *et al.* (1987) para o município de Angra dos Reis, onde realizou tipos de análises para associar precipitações e deslizamentos. Considerando como deslizamentos, os eventos que estiveram associados aos acumulados de precipitação de 100 mm em 1 dia, ou de 150 mm em 2 dias, ou de 200 mm em 3 dias consecutivos, que foi intitulado por Soares (2006) como “Critério T”.

Gusmão Filho (1997) discorreu que a maior dificuldade na correlação entre precipitação e deslizamentos está na falta de séries históricas de dados pluviométricos da área a ser estudada e na falta de registros históricos dos escorregamentos. Por isso, como na pesquisa de Oliveira (2014), foram utilizadas as informações desenvolvidas por métodos de estimativa de precipitação que auxiliam no monitoramento, e na aquisição de dados pluviométricos especializados, a partir de técnicas de sensoriamento remoto (SR).

Oliveira (2005) em seu trabalho ressaltou a vantagem da utilização do monitoramento pluviométrico para determinação de ocorrência de períodos críticos de movimento de massa. Porém, o autor também apontou alguns fatores limitantes como a calibração de inspeções, e a dificuldade de acessos em muitas regiões, que acabou dificultando a identificação da chuva crítica associada ao processo de movimentação.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA E DADOS

Para esta parte do trabalho, são discutidas as etapas realizadas para alcançar os objetivos apresentados, onde primeiro, é apontada a região de estudo por onde passa o oleoduto ORBIG, seguido da obtenção dos dados pluviométricos por meio do hidroestimador GPM. E, assim, juntando essas informações para a aplicação do método estatístico que indique os extremos de precipitação e a verificação das áreas mais afetadas e com maior risco de novo acontecimento.

3.1 Região de estudo

O oleoduto ORBIG, percorre uma extensão de 123 Km com origem no Terminal de Angra dos Reis (RJ) e destino ao Terminal de Campos Elíseos (Duque de Caxias - (RJ), levando produtos (petróleo) para refino em dutos de 38 cm diâmetro. Localiza-se na região de estudo, compreendida por onde passa o duto e seu entorno (latitudes 20° 45' 56" S, 23° 22' 08" S e longitudes 040° 57' 23" W, 044° 53' 19" W), passando pelos municípios de Angra dos Reis, Belford Roxo, Mangaratiba, Itaguaí, Queimados, Seropédica, Nova Iguaçu, Duque de Caxias (Figura 3.1).

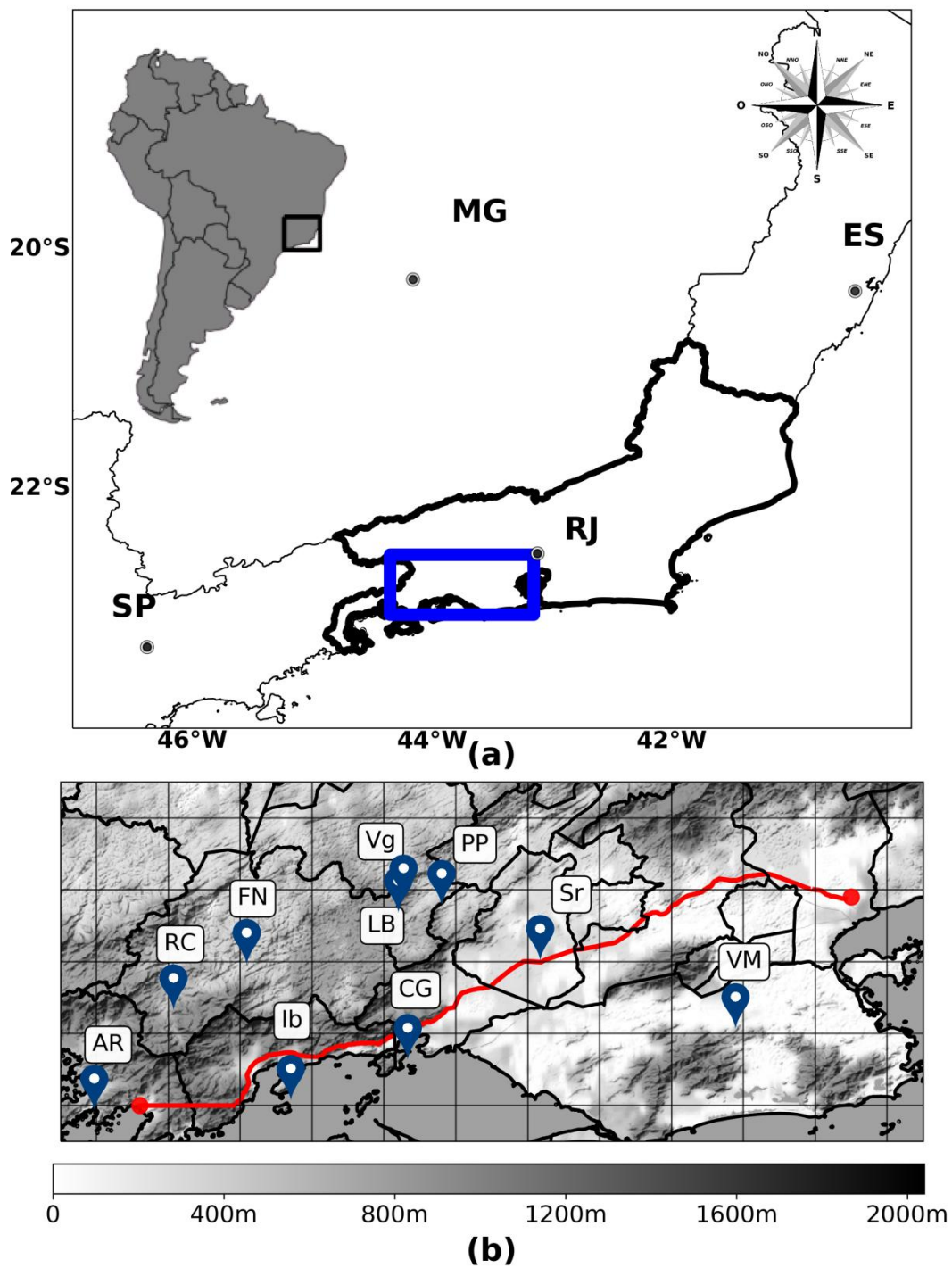


Figura 3.1 – Localização geográfica do estado do Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil (painel superior) destacando a localização do retângulo azul da região de estudo: latitudes $22^{\circ} 55' 56''$ S, $23^{\circ} 05' 08''$ S e longitudes $043^{\circ} 15' 23''$ W, $044^{\circ} 35' 19''$ W. O painel inferior descreve a região de estudo, o oleoduto ORBIG (linha vermelha), os pontos da grade (tracejado quadrados) do conjunto de dados do GPM e a localização das estações pluviométricas.

3.2 Dados

A distribuição espaço-temporal da precipitação durante o período ocorrido entre 2000 e 2019, foi realizada com os dados de precipitação, que serão melhor detalhados a seguir.

3.2.1 GPM

Dentro dos vários produtos do GPM, foi escolhido para ser utilizado os produtos 3BHR-V6, porque tem a versão 6 do IMERG, com o algoritmo que junta as primeiras estimativas de precipitação coletadas em 2000 até 2014 durante a operação do satélite TRMM com estimativas de precipitação mais recentes coletadas durante a operação do satélite GPM. A junção é feita pelo Sistema de Processamento de Precipitação (PPS) que evoluiu do Sistema de Informação e Dados Científicos do TRMM (TSDIS). O PPS processa, analisa e arquiva os dados da missão GPM, de satélites parceiros e da missão TRMM.

O produto 3BHR-V6 fornece precipitação acumulada de 1 hora com frequência temporal de 30 em 30 minutos, e com resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ de latitude e longitude, que é aproximadamente 11 km x 11 km. Foram aplicados esses dados para a área mencionada anteriormente na seção 3.1 e para o período compreendido de 01/06/2000 a 30/06/2019.

3.2.2 Pluviômetros

Para gerar uma validação estatística da precipitação acumulada semanal e da precipitação acumulada mensal, buscou-se fazer uma correlação de Spearman, melhor descrita no item 3.3.1, entre os dados observados pelos pluviômetros e os dados estimados pelo GPM. Para assim definir o quão confiável representa a precipitação na região de estudo.

Os dados pluviométricos foram obtidos das séries temporais de precipitação do sistema HydroWeb (ANA, 2010) que contém registros diários de precipitação de várias redes de estações meteorológicas, onde destacam-se principalmente à Agência Nacional de Águas (ANA), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). O critério para as escolhas das estações seguiu: (1) séries temporais sem dados ausentes em pelo menos um ano, (2) a série com período disponível dentro do intervalo de tempo do GPM e (3) a estação dentro da área de estudo. Essas escolhas descartaram um número significativo de estações, e apesar da distribuição espacial não ser uniforme ao longo da tubulação, foi possível trabalhar apenas com as estações com séries sem dados ausentes ou dados espúrios, totalizando dez estações. As estações com suas informações como localização, período de dados e sua respectiva

agência são mostradas na Tabela 3.1. A distribuição espacial das estações pluviométricas é apresentada na Figura 3.1.

Tabela 3.1 - Estações Pluviométricas

ESTAÇÕES	LONGITUDE(°)	LATITUDE(°)	DATA		DURAÇÃO (ANO)	REDE	ACUMULADO
			INICIAL	FINAL			
Coroa Grande (CG)	-43,9	-22,9	01/01/2001	31/12/2005	5	CPRM	
Fontes Novas (FN)	-44,1	-22,8	01/01/2005	31/12/2012	13	LIGHT	
Ibicuí (Ib)	-44,0	-23,0	01/01/2001	31/12/2005	5	CPRM	
Lajes Barramento (LB)	-43,9	-22,7	01/01/2005	28/12/2012	8	LIGHT	mm/dia
Pereira Passos (PP)	-43,8	-22,7	01/01/2003	31/12/2012	10	CEMADEN	
Rio Claro (RC)	-44,2	-22,8	01/01/2000	31/12/2001	13	CEMADEN	
Vigários (Vg)	-43,9	-22,7	01/06/2000	31/12/2012	13	CEMADEN	
Vila Militar (VM)	-43,4	-22,9	01/01/2008	31/12/2018	11	INMET	
Angra dos Reis (AR)	-44,3	-23,0	01/01/2018	31/12/2018	1	INEA	mm/h
Seropédica (Sr)	-43,7	-22,8	01/06/2011	31/12/2018	19	INMET	

3.2.3 Reanálise ERA-5

Com os resultados obtidos da classificação das maiores chuvas, foi implementado uma análise sinótica com as informações da reanálise ERA-5, obtida no *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (Reanálise global ERA5 - HERSBACH, 2020). Acesso em: 25/07/2020 com resolução espacial de 0,25° (31 km) e resolução temporal de 1 hora, atualizada mensalmente.

A reanálise ERA-5 é a quinta geração de reanálises atmosféricas climatológica e global do ECMWF, que começou com as reanálises FGGE (*First GARP Global Experiment*) produzidas na década de 1980, seguida por ERA-15, ERA-40 e mais recentemente ERA-Interim. O ERA-5 cobre o período de janeiro de 1950 até quase o tempo real. O ERA-5 é produzido com resolução de 31 km e um conjunto em 4D de assimilação de dados do Sistema Integrado de Previsão do ECMWF (IFS) com coordenada vertical híbrida (pressão-sigma) de 137 níveis, até um nível superior de 0,01 hPa. Os dados atmosféricos nesses níveis são

interpolados para 37 níveis de pressão (os mesmos níveis do ERA-*Interim*). Dados de superfície ou de nível único também estão disponíveis, contendo parâmetros 2D, como precipitação, temperatura a 2 metros, radiação do topo da atmosfera e integrais verticais em toda a atmosfera.

Para este trabalho foram utilizados os níveis de pressão ao nível médio do mar (PNMM), 850 hPa, 500 hPa e 200 hPa. As variáveis utilizadas foram: pressão (hPa), altura geopotencial (m), ventos meridional e zonal (m/s), e umidade específica (g/kg), compondo assim os campos meteorológicos para realizar a análise sinótica de cada evento extremo de precipitação.

3.3 Metodologia

3.3.1 Validação do GPM

Por meio do *software Python*, foram calculados os acumulados de precipitação diário, semanal e mensal, tanto para as estimativas do GPM quanto para os dados da rede de pluviômetros, em todo o período disponível. As estações são provenientes da ANA e do INMET, e tem suas medições diárias realizadas às 09:00 h da manhã e por esta razão, utilizou-se na validação este horário para as medições do IMERG, compondo um dado de precipitação diário partindo do mesmo horário.

Em seguida, foi verificado se havia algum dado corrompido ou ausente na série de dados dos pluviômetros. A partir daí, puderam ser aplicados métodos estatísticos que dessem maior confiança nos resultados e então gerassem os campos apresentados.

Para verificar previamente os dados do GPM, estes foram testados de forma a obter o seu desempenho e sua precisão em alguns locais na região. Usando a correlação de Spearman (Equação 1) como estatística indicadora não paramétrica para avaliar o desempenho dos dados de precipitação do GPM com uma avaliação espacial e temporal. Para isso, foi comparado os dados pluviométricos de cada estação com o ponto mais próximo da grade do GPM. Sendo aplicado nos pluviômetros e no GPM a correlação de Spearman para analisar a força de associação entre o GPM e os dados de precipitação *in situ*, medindo assim, entre os acumulados de precipitação semanais e mensais, a capacidade do GPM de representar com precisão a precipitação real.

Para o coeficiente de correlação entre 0,0 a 0,19 foi considerado como coeficiente muito fraco, a correlação de 0,2 a 0,39 um coeficiente fraco, para a correlação de 0,4 a 0,69 como moderado, e para a correlação de 0,7 a 0,89 um coeficiente forte, e para os valores entre 0,9 e 1,0 um coeficiente muito forte de correlação. Essa classificação foi utilizada de forma semelhante por Teodoro, *et al.*, 2020.

Onde r é o grau de correlação de Spearman, d é a diferença entre as sequências dos valores correspondentes de precipitação, e n é o número das amostras (WILKS, 1995).

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d^2}{n(n^2-1)} \quad (1)$$

3.3.2. Análise de extremos diário

Para identificar os eventos extremos de precipitação, utilizou-se como base o trabalho de Ramos *et al.* (2014) e Ramos *et al.* (2017), o qual propôs um meio de classificar cada evento extremo, de acordo com o quantitativo de precipitação diário em cada célula de grade e a proporção das áreas afetadas.

A análise e classificação de eventos de precipitação dependem não apenas do conjunto de dados de precipitação disponível, mas também, dos critérios e do propósito a serem alcançados. Por isso, buscou-se uma metodologia que pudesse classificar as taxas de precipitação dos principais eventos extremos que cobrissem toda a região do ORBIG, a partir do conjunto de dados do IMERG (GPM). Outro propósito a ser alcançado, foi o levantamento de várias classificações de eventos extremos de precipitação relativos a toda a região de estudo e algumas sub-regiões; ou seja, os oito municípios por onde passa o oleoduto.

Algumas formas de identificação foram usadas em outras aplicações por Kaspar e Müller (2008) que avaliaram eventos de intensa precipitação em grande escala, e por Junker *et al.* (2008) que verificaram anomalias padronizadas para antecipar precipitações extremas nas montanhas do Norte da Califórnia.

O método aplicado, de acordo com Ramos *et al.* (2014), para caracterizar e classificar em cada dia a severidade da precipitação e sua extensão espacial é descrito a seguir:

$$N_{c,i,j} = (\text{prec}_{c,i,j} - \text{media}_{c,i,j})/dp_{c,i,j} \quad (2)$$

Onde: $N_{c,i,j}$ é a anomalia da precipitação padronizada para um dia (c) em um determinado ponto de grade (i, j), $prec_{c,i,j}$ é o valor de precipitação para um dia (c) em um determinado ponto de grade(i, j), $media_{c,i,j}$ é o valor médio diário para um certo dia (c) e ponto (i, j) , $dp_{c,i,j}$ é o desvio padrão da média diária para um dia (c) e um ponto da grade(i, j).

Além disso, foi utilizada a normalização da precipitação, obtida em cada ponto de grade de uma medição diária da frequência dos eventos.

O período de referência para o cálculo da média climatológica diária e do desvio padrão foi todo o período do GPM de 06/2000 a 06/2019 (quase 20 anos de climatologia). Segundo Ramos *et al.* (2014), um método para suavizar a série temporal climatológica, é a aplicação de uma média contínua de 7 dias em cada ponto da grade. Porém, a variação de 7 a 21 dias corridos nas médias não gerou impactos significativos na seleção dos eventos de precipitação mais extremos, apenas algumas mudanças na ordem dos eventos foram notadas. Então, uma análise de sensibilidade diferente da média contínua foi realizada a fim de verificar o impacto na seleção da duração dos eventos. Levando nesse trabalho a considerar apenas os dias úmidos, ou seja, dias com precipitação acima de 1 mm, e o mascaramento do oceano adjacente. Em seguida, foi obtida as anomalias de precipitação acumuladas por um período (P) e para cada período (P) foi normalizada as anomalias diárias utilizando-se a Equação 2.

Então, com o intuito de destacar os níveis de maior intensidade de precipitação, outro cálculo foi realizado onde a intensidade ou Raridade de um evento (R) foi expressa diariamente por um índice obtido por:

$$R = A \times M \quad (3)$$

Onde: A é a área (em porcentagem) com anomalia de precipitação maior que duas vezes o desvio padrão (2dp) e M é o valor médio destas anomalias para todos os pontos da grade que são caracterizados por anomalia de precipitação maior que duas vezes o desvio padrão (2dp).

Observa-se que o percentil de 90% da distribuição diária de precipitação representa os maiores acumulados de precipitação da série de dados utilizada na área de estudo. Por isso, foi usado duas vezes o desvio padrão da média diária (2dp), uma vez que este valor gera um

limite mais confiável e semelhante ao limiar de percentil de 90%. Assim, o método de classificação leva em conta dois fatores importantes, a área afetada pelo episódio de chuvas e a intensidade do evento.

Então, o índice de Raridade de um evento (R) leva em consideração a quantidade de precipitação que foi acima da média, e a quantidade espacial atingida pela precipitação acima da média. Gerando um índice (R) para cada evento de chuva, que permite criar uma classificação capaz de identifica os casos mais intensos, segundo esse método.

3.3.3. Análise de extremos de vários dias

Os passos anteriores descritos permitiram classificar os índices de cada dia através da intensidade da precipitação e da extensão espacial associada. Porém, o levantamento dos extremos diários, mesmo que importantes, não cobrem os casos de chuva persistentes (mais de 2 dias contínuos). Por isso, o próximo passo visou obter as anomalias de precipitação acumuladas para um determinado período (n).

Para isso, foi calculado a soma da precipitação diária normalizada obtida na Equação 2, para n períodos de 2 a 5 dias. O cálculo das anomalias de precipitação acumuladas, foi realizada a partir da soma das anomalias normalizadas (NCC), como exemplificado na Equação 4, para vários períodos de dias (n):

$$NCC_{p,i,j} = \sum_{c=1}^n N_{c,i,j} \quad (4)$$

Por fim, foi calculada da magnitude do extremo da precipitação acumulada, repetindo o passo 2, porém considerando as anomalias de precipitação acumuladas. Da mesma maneira que havia sido calculado o índice de raridade (R) para anomalias diárias do $N_{c,i,j}$, foi calculado o índice de raridade para anomalias acumuladas (RNCC) do NCC, como obtido na Equação 3.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

4.1 Validação do GPM com dados *in situ*

Nesta seção, apresentam-se os resultados da avaliação do GPM para a região de estudo. A comparação semanal média obtida com a correlação de Spearman entre os dados do GPM com os dados de chuva em solo foram fortes, porém variando para cada região (Figura 4.1a).

A Figura 4.1a apresenta uma porcentagem de 70% das estações com uma correlação de moderado a forte, sendo 6 delas maior que 0,6. Observa-se que a correlação mais forte foi entre 0,7 e 0,8, alcançada nas estações de Ibicuí, Vigários, Lajes Barramento e Pereira Passos. Por outro lado, as estações de Angra dos Reis, Coroa Grande e Rio Claro apresentaram correlações mais fracas, entre 0,3 a 0,4, possivelmente causadas pelo tamanho da resolução e pela separação terra-oceano do plano de grade do GPM (HUFFMAN, 2019).

Na aferição da escala mensal (Figura 4.1b), em geral, observa-se que as correlações tiveram valores mais fortes quando comparadas à escala semanal. A correlação na escala mensal apresentou resultados de moderado em 60% das estações, a forte em 40% das estações. Nota-se que a diferença espacial da correlação nas estações podem ser atribuídas a variação do padrão local de distribuição e intensidade da precipitação. Sendo um indicativo da capacidade do GPM para representar os padrões e variabilidade espacial da precipitação em cada local. Com base também nesses resultados, foi verificado que estão de acordo com o estudo de Serrão *et al.* (2016), que comparou os dados do GPM com os dados das estações de medição no Norte do Brasil e suas correlações encontradas foram entre 0,5 e 0,85 para a escala mensal, enquanto que para a escala semanal os valores variaram de 0,35 a 0,70.

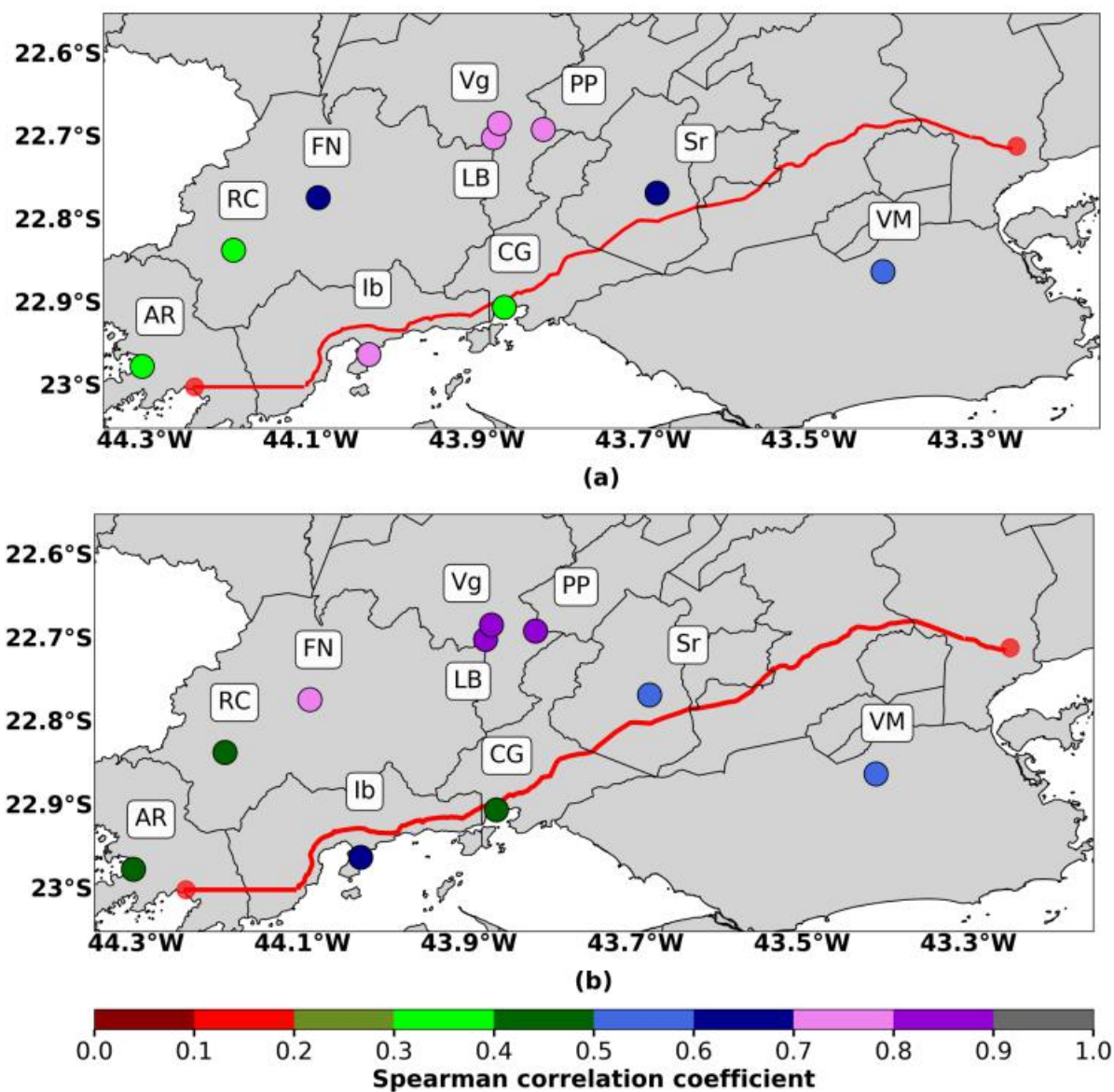


Figura 4.1. (a) Correlação de Spearman para acumulado semanal de precipitação entre estações locais e hidroestimador GPM. (b) Correlação de Spearman para acumulado mensal de precipitação entre estações locais e hidroestimador GPM.

4.2 Normalização da precipitação do GPM

Nesta seção, apresentam-se os resultados sobre a análise de classificação diária da seção 3.3.2, onde foi identificado os principais eventos extremos ao longo do período de estudo de 20 anos (de 06/2000 a 06/2019) com base no índice de raridade R. Sendo apresentado neste estudo, apenas os 10 principais eventos em maiores detalhes. É importante ressaltar também que as classificações foram definidas de acordo com a alta precipitação diária, que influenciou

áreas relativamente grandes em torno da região do duto, independentemente da ocorrência de impactos significativos sobre esta.

Considerando que as curvas dos valores de magnitude (R) foram decedentes (não mostrado), para os primeiros 10 casos, devido a semelhança para todos os acumulados, optou-se por não apresentar as respectivas figuras, por uma questão de simplicidade. Por isso, foram analisados os mais afetados levando em consideração os 10 principais casos, conforme mostrado na Tabela 4.2.

O resultado apresentado na Tabela 4.1 são dos 10 maiores dias de extremos para a área de estudo, junto com o percentual da área que tem anomalias de chuva maior que 2dp, o valor médio dessas anomalias e o índice de raridade usado para classificar os dias. Inclusive, o resultado do método de classificação leva em conta dois fatores, um pela área afetada pelo evento de chuva (anomalias maiores que 2dp), e outro pela intensidade do evento (vinda da média dos valores das anomalias acima de 2dp). Também expõem na Tabela 4.1 que a maioria dos 10 principais eventos extremos ocorreram em 2001 a 2011, sendo o indicativo deste fato as forçantes de frequência interanual como o El Niño e o decenal como Oscilação Decadal do Pacífico, além do aquecimento do Oceano Atlântico, conforme Raimundo *et al.* (2014), contudo para melhor análise precisaria de um maior período. Outro fato importante foi que a maioria dos 10 primeiros eventos ocorreram durante o verão austral, com exceção do evento de 2018 que ocorreu em agosto no inverno austral. Com destaque os casos com colocação: 2º (3 de fevereiro, 2008), 3º (29 de março de 2001) e 4º (3 de agosto de 2018), que corresponderam aos casos com desastres significativos e vítimas na região (NERY; MALVESTIO, 2017; SELUCHI *et al.*, 2017).

Tabela 4.1 - Os dez eventos de precipitação de maior risco.

<i>Ranking</i>	<i>Data</i>	Precipitação (mm/dia)	A (%)	M	R	Sinótica
1	05/01/2008	391,0	97,0	6,3	619,0	Baixa Pressão
2	03/02/2008	236,9	98,5	3,6	362,2	ZCAS
3	29/03/2001	371,8	76,1	3,4	262,5	ZCAS
4	03/08/2018	182,4	95,5	2,5	242,7	Pós-frontal
5	14/03/2010	309,4	74,6	3,0	227,6	FF
6	31/12/2009	226,2	94,0	2,3	224,7	Baixa Pressão
7	13/03/2009	276,5	85,0	2,6	223,0	ZCAS
8	10/02/2006	234,1	97,0	2,1	209,2	ZCAS
9	11/01/2011	184,5	98,5	1,9	190,7	ZCAS
10	07/02/2001	233,6	85,0	2,2	189,2	FF

Já a Tabela 4.2 mostra a classificação dos mais altos índices de raridade para as anomalias acumuladas (RNCC) em relação aos diferentes períodos acumulados (2, 3, 4 e 5 dias), sendo uma continuação da classificação diária individual anterior (Tabela 4.1). Como previsto, nas posições superiores da Tabela 4.2 o mesmo evento foi verificado para diferentes acumulados (R2, R3, R4, R5). Inclusive alguns eventos ocuparam as mesmas fileiras, por exemplo, os dois primeiros eventos principais da Tabela 4.1, ao passo que os outros ocorrem em posições diferentes. A primeira posição nos *rankings* diários, que ocorreu em 5 de janeiro de 2008, apareceu na análise de vários dias em todos os períodos acumulados, desde 2 até 5

dias. Neste evento (5 de janeiro de 2008), a precipitação anômala ficou acima de 9 dp, registrada sobre o oeste do estado do Rio de Janeiro (Figura 4.5) com 391 mm registrados para 1 dia na região, além do acúmulo de anomalia em alguns pontos da grade atingindo magnitude acima de 10 dp.

A análise para escalas de tempo mais longas também foi usada para a região, a fim de analisar eventos de chuvas intensas de curta duração, e também os casos de chuvas contínuas que levaram a grandes acúmulos de precipitação. Indicando que a precipitação contínua cobriu uma extensa área, resultando em grandes desastres naturais. Embora não tenha havido desastre no oleoduto, fica claro que o mapeamento feito neste trabalho é de grande importância.

Tabela 4.2 - Os dez eventos de precipitação de maior risco para acumulados de 2 a 5 dias.

Data	R2	Data	R3	Data	R4	Data	R5
05/01/2008	620,7	05/01/2008	620,7	05/01/2008	620,7	05/01/2008	620,7
02/02/2008	417,8	14/03/2010	434,1	14/03/2010	437,1	14/03/2010	437,1
14/03/2010	405,2	02/02/2008	426,7	02/02/2008	426,7	02/02/2008	428,1
28/03/2001	292,0	28/03/2001	298,2	31/12/2009	391,4	31/12/2009	399,0
03/08/2018	257,0	03/08/2018	257,0	28/03/2001	298,2	28/03/2001	301,4
24/01/2010	238,0	24/01/2010	238,0	07/02/2001	267,5	10/02/2006	269,4
31/12/2009	232,3	27/01/2006	234,0	03/08/2018	258,4	07/02/2001	268,8
13/03/2009	230,6	31/12/2009	233,9	24/01/2010	255,8	03/08/2018	258,4
10/02/2006	212,3	13/03/2009	230,6	27/01/2006	253,2	24/01/2010	255,8
03/01/2011	204,6	10/02/2006	213,5	09/02/2008	235,0	27/01/2006	253,2

Nos 10 principais casos apresentados na Tabela 4.2, os índices de raridade (R_{ncc}) variam consideravelmente de acordo com a escala de tempo (2, 3, 4, 5 dias). Por exemplo, o segundo evento no acumulado de 2 dias (2 Fevereiro de 2008) registrou valores singulares nesta escala temporal, porém nas classificações seguintes, de dias mais longos, aparece menos relevante, ocupando a 3^a posição. No contraponto, o terceiro evento principal de 2 dias (R2) (14 de Março de 2010) passou para segundo lugar da classificação dos 10 maiores índices de precipitação acumulada nos dias 3, 4 e 5. Por outro lado, ao analisar o extremo de precipitação do dia 31 de Dezembro de 2009, presente como 7^a e 6^a posição da classificação dos 10 eventos de precipitação acumulada de 2 e 3 dias, sua colocação passou para a quarta posição no acumulado de 4 e 5 dias. Ou seja, este evento foi de uma magnitude $R = 232$ no período de 2 dias para $R = 398$ no período de 5 dias, um aumento de 58% sobre os períodos acumulados.

4.3 Análise meteorológica para os casos identificados

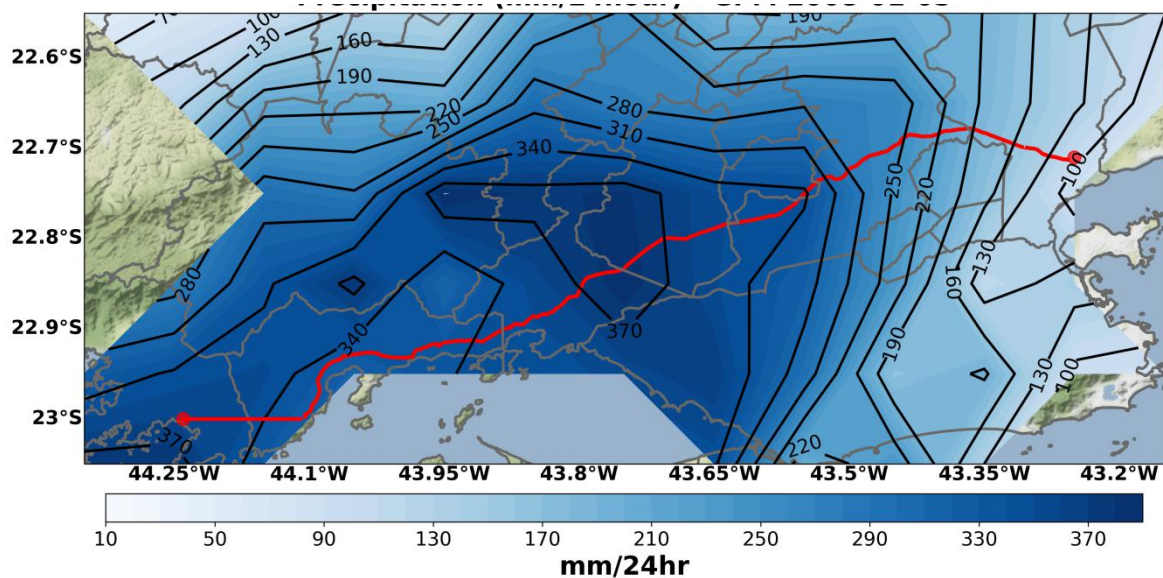
Nesta seção, são mencionados os resultados encontrados sobre o padrão de circulação atmosférica na formação dos 10 principais eventos na região de estudo, porém, é apresentado com maior detalhe apenas os 5 maiores, pois os casos seguintes apresentaram condições sinóticas similares, dispensando a necessidade de serem apresentados.

Nos 10 casos, houve diferentes configurações dinâmicas, porém em todos estavam presentes o transporte de umidade e a alta concentração de umidade dentro da área de interesse. Dentre os casos, metade foram associados à influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um caso ligado a circulação pós-frontal (PF), dois casos de instabilidades foram diretamente conduzidos pela frente fria (FF) e dois casos foram induzidos pelo estabelecimento da condição de baixa pressão (BP). Esses sistemas meteorológicos (ZCAS, PF, FF, BP) são responsáveis pela grande variabilidade da precipitação sobre o Rio de Janeiro (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Os resultados estão de acordo com o trabalho de LIMA *et al.* (2010), os quais sugeriram que as chuvas intensas no verão, são as responsáveis por quase todos os desastres naturais no Sudeste do Brasil, e estão relacionadas principalmente às FF e as ZCAS.

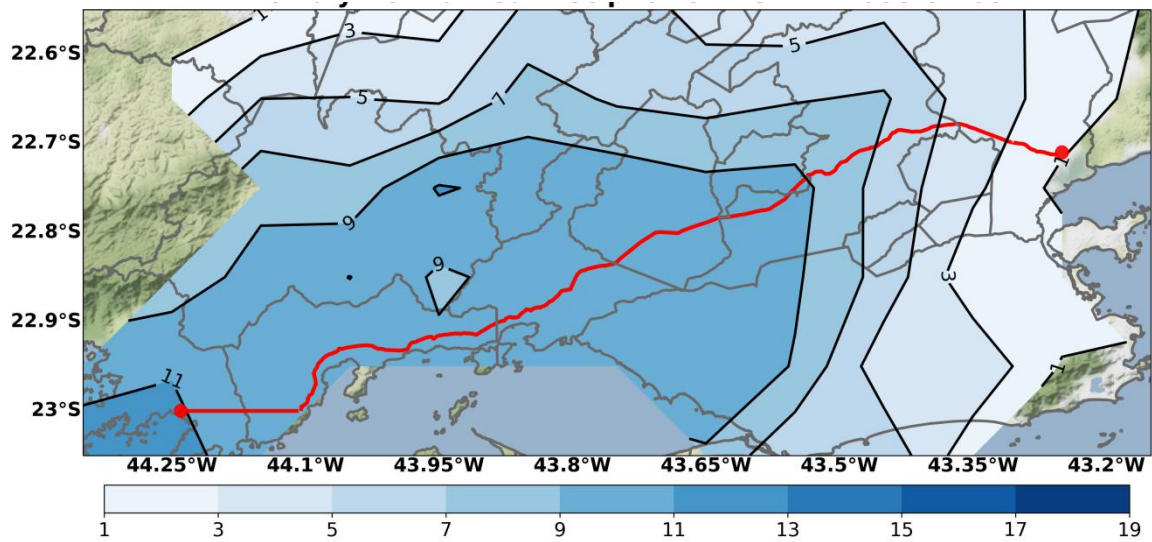
O primeiro evento de precipitação acumulada da classificação, ocorrido em 05/01/2008, obteve 391,0 mm/dia (Figura 4.2 a) e uma área total afetada de $A = 97\%$ da região da

pesquisa com uma média de anomalia correspondendo a $M = 6,4$, resultando em uma magnitude de $R = A * M = 629$ (Figura 4.2 b). Este evento na classificação, em 5 de janeiro de 2008, esteve associado a uma baixa pressão de um ciclone, por onde a precipitação intensa aconteceu na parte oeste do Rio de Janeiro, e em algumas pequenas outras localidades vizinhas (Figura 4.2b). O padrão sinótico nesses dias foram caracterizados por um sistema estacionário de baixa pressão em baixos níveis. Além disso, a configuração da baixa proporcionou advecção de calor e umidade, proveniente das porções NW e W do continente, para o local de interesse. Além disso, promoveu convergência, que favoreceu o desenvolvimento de muitas nuvens convectivas (Cbs) e conseqüentemente, chuvas intensas, conforme visto nas imagens de satélite do GOES nas Figuras 4.3a e 4.3b.

Na verificação dos campos de níveis médios e altos observa-se uma atmosfera baroclínica favorecendo a instabilidade. É possível observar, pelas linhas de altura geopotencial em 500 hPa, um cavado a oeste da baixa em superfície, indicando um suporte dinâmico necessário para sua persistência. Além disso, o sistema de baixa pressão está sobre a saída polar do jato em 200 hPa, o que favorece o movimento ascendente (Figura 4.4b). Esta condição dinâmica associada contribui para promover a divergência em altos níveis e a convergência em 850 hPa (Figura 4.5b), induzindo a formação de precipitação convectiva sobre esta região.

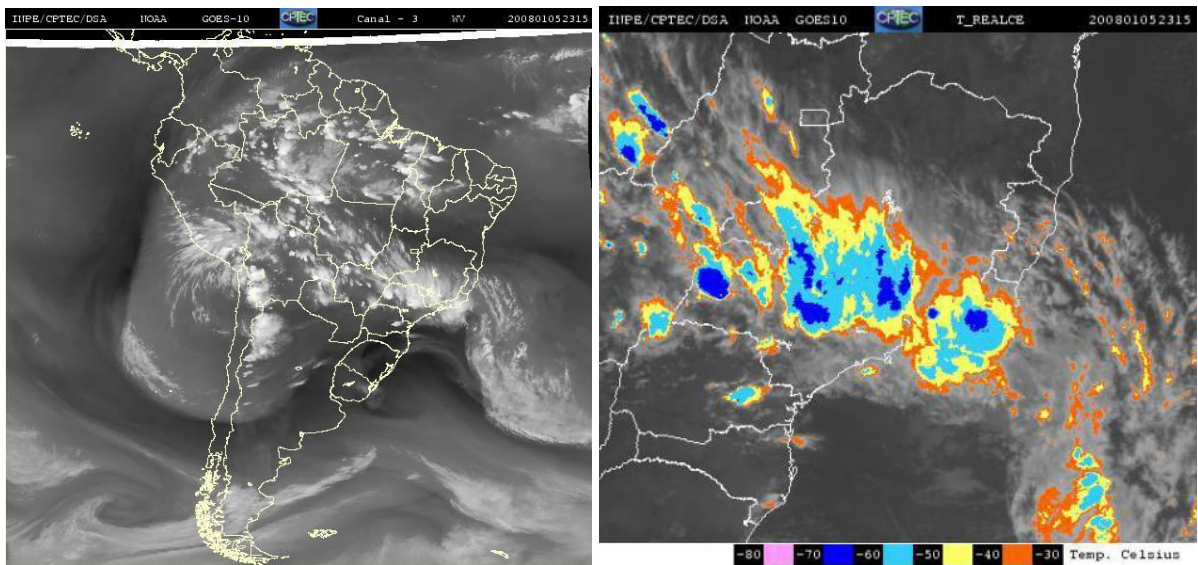


(a)



(b)

Figura 4.2 - (a) Acumulado de precipitação diária (em cores e linhas de contorno preto - mm.dia⁻¹) e (b) anomalia de precipitação diária padronizada (em cores e linhas de contorno preto), para o dia 05/01/2008. As linhas vermelhas representam as transmissões do oleoduto.



(a)

(b)

Figura 4.3 - Imagens do satélite GOES-10 (a) canal 3 (vapor d'água) (b) canal do infravermelho (realçado), do dia 05/01/2008 às 23:15 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.

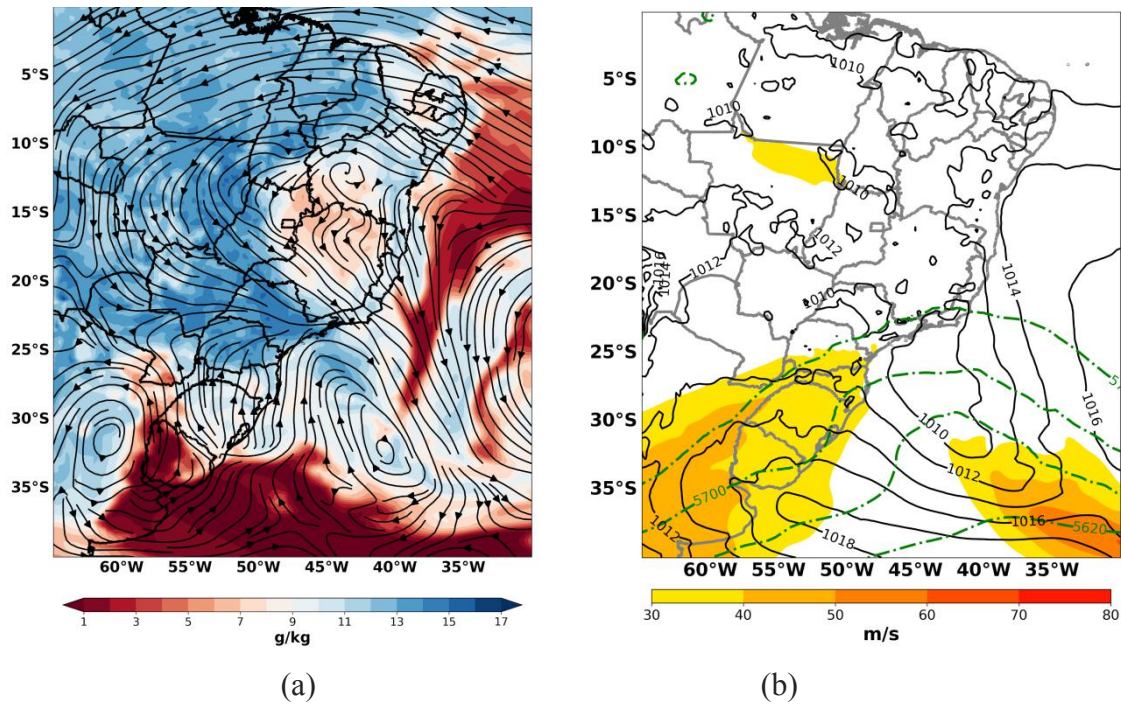


Figura 4.4 - (a) Campo de Umidade específica (g/kg) em escala de cores e vento em 850 hPa em linhas de corrente (m/s) (b) Pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas sólidas pretas, com altura geopotencial em 500 hPa ($\text{mgp} \cdot 10^{-1}$) em linhas tracejadas em verde e magnitude do vento em 200 hPa (m/s) em escala de cores.

Campos do ERA-5 para o dia 05/01/2008 às 18:00 UTC.

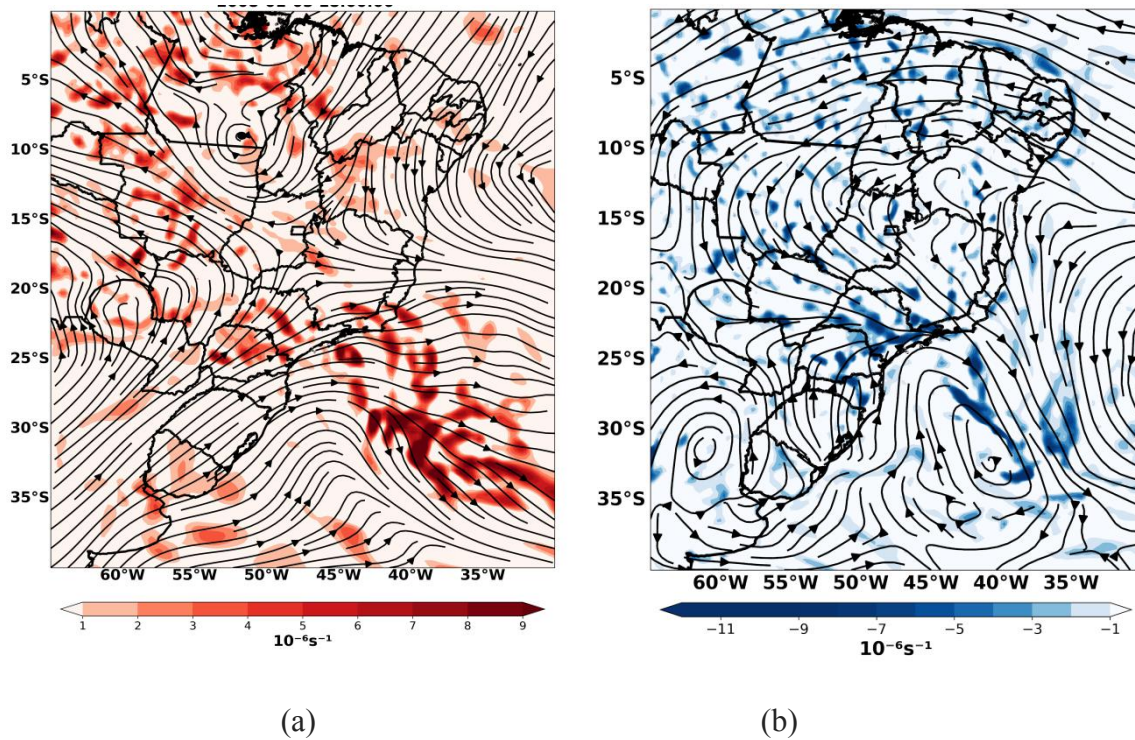
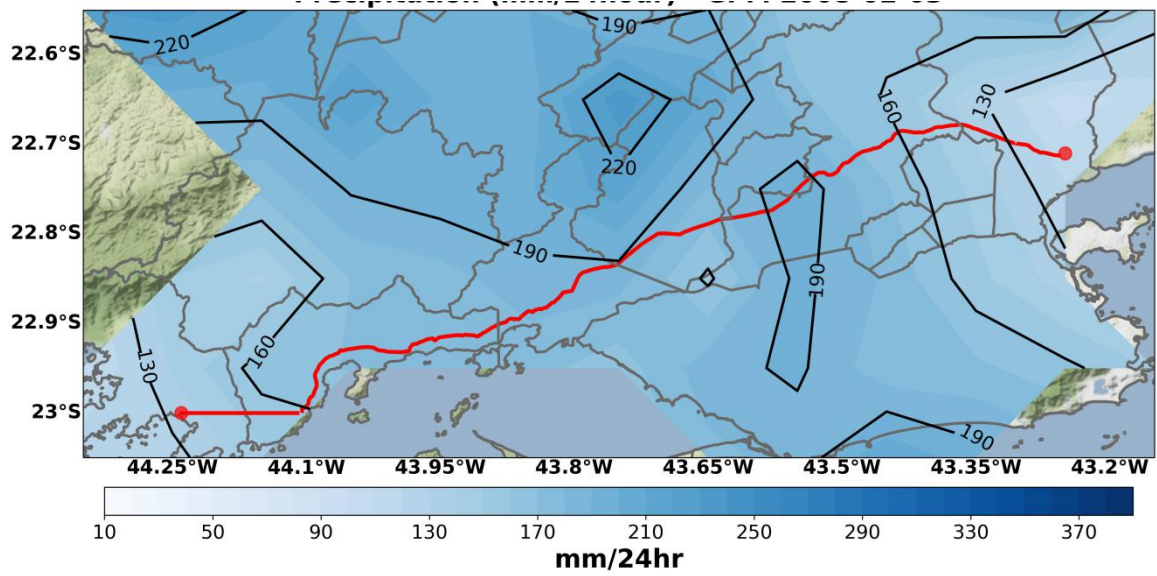


Figura 4.5 - (a) Campo de divergência do vento em 300 hPa ($10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 300 hPa em linhas de corrente. (b) Campo de divergência do vento em 850 hPa ($10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 850 hPa em linhas de corrente. Campos do ERA-5 para o dia 05/01/2008 às 18:00 UTC.

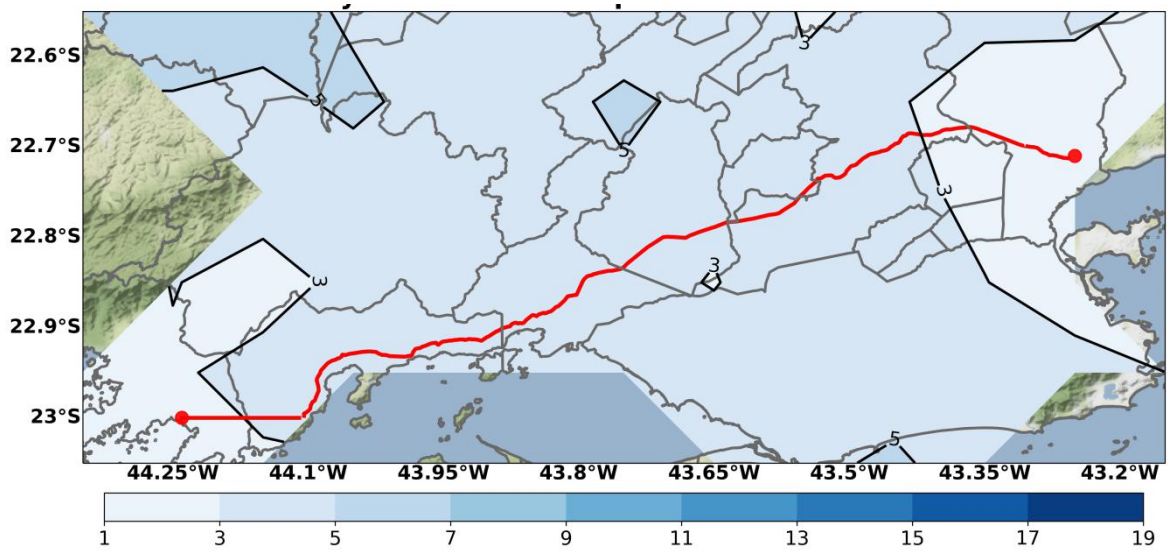
O segundo evento melhor classificado, correspondente ao dia 3 de fevereiro de 2008, um evento com maior amplitude, onde $A = 98,5\%$ da região (Figura 4.6b), podendo ser caracterizado pela precipitação que abrangeu toda a área de estudo, e chegou a alcançar o máximo de 236,9 mm/dia (Figura 4.6a), com impactos socioeconômicos significativos, que resultaram em nove mortes, de acordo com Pereira *et al.* (2008). Assim, este evento foi associado a ZCAS, que é a principal fonte de chuvas em grande escala no Sudeste do Brasil durante o verão austral (LIMA *et al.*, 2015). Em níveis médios, um cavado a oeste do sistema em superfície gerou a condição dinâmica favorável para intensificação da frente fria a Leste do sistema em 500 hPa, e também, pelo jato subtropical em 200 hPa, posicionado na retaguarda da frente fria (Figura 4.8b). Em altos níveis, o jato estava configurado de forma que sua entrada equatorial se posicionava sobre uma área bem próxima a área de estudo, o que deu condições favoráveis ao movimento ascendente.

Na Figura 4.8b, a linha verde representa a altura geopotencial em 500 hPa, onde é marcado um forte gradiente no encontro de massas de ar, devido à posição frontal. Como consequência, essa condição resultou no aumento do transporte de umidade, do ar mais quente de Noroeste vinda do continente, que convergiu com o transporte de umidade e ar frio de Sudoeste do oceano (Figura 4.8a), o que favoreceu a formação de convecção intensa, sendo confirmado pelo escoamento em altos níveis, e mostrando que a Região de estudo estava a Leste do eixo do cavado de ar superior (Figura 4.9a), portanto, estava sinoticamente favorável a ocorrência de tempestades. No evento esteve presente as características da banda de nebulosidade persistente, compondo a orientação Noroeste-Sudeste, sendo identificáveis através das imagens de satélites pela radiação de onda longa (Figura 4.7 a e b), normalmente encontrada na primavera e no verão (SATYAMURTY *et al.*, 1998; CARVALHO *et al.*, 2004).

Outra informação, adquirida através dos campos do ERA-5 e dos dados de base do GPM, foi que a duração da passagem deste caso de ZCAS por todo Brasil foi de 7 dias, com 2 dias de intensa chuva sobre o RJ. Ao verificar a consonância dos resultados com os relatórios do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), e do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro (AlertaRio), pode-se identificar que eram semelhantes, como nos demais eventos de ZCAS. Conforme Barcellos *et al.* (2016), que pesquisou os sistemas meteorológicos de escala sinótica que mais afetaram o município de Duque de Caxias-RJ, e também verificou que a ZCAS tinha o maior impacto por terem as suas chuvas intensas e contínuas, conforme este trabalho.



(a)



(b)

Figura 4.6 - (a) Acumulado de precipitação diária (em cores e linhas de contorno preto - mm.dia⁻¹) e (b) anomalia de precipitação diária padronizada (em cores e linhas de contorno preto), para o dia 03/02/2008. As linhas vermelhas representam as transmissões do oleoduto.

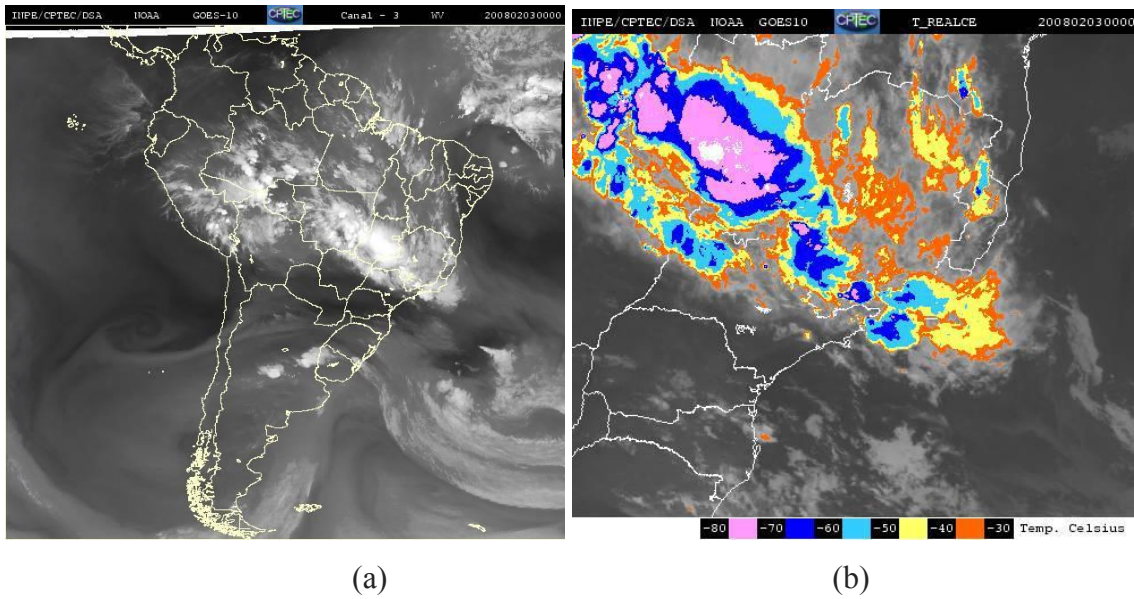


Figura 4.7 - Imagens do satélite GOES-10 (a) canal 3 (vapor d'água) (b) canal do infravermelho (realçado), do dia 03/02/2008 às 00:00 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.

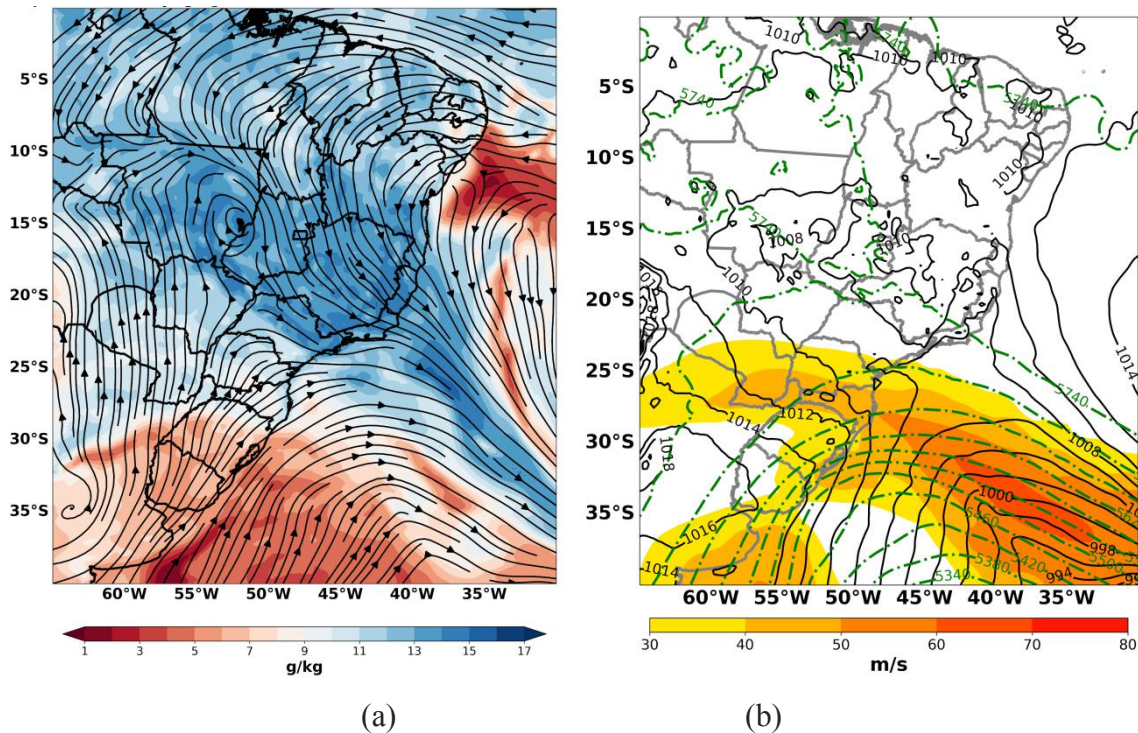


Figura 4.8 - (a) Campo de Umidade específica (g/kg) em escala de cores e vento em 850 hPa em linhas de corrente (m/s) (b) Pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas contínuas pretas, com altura geopotencial em 500 hPa ($\text{m} \cdot \text{g} \cdot \text{p}^{-1}$) em linhas tracejadas em verde e magnitude do vento em 200 hPa (m/s) em escala de cores. Campos do ERA-5 para o dia 03/02/2008 às 18:00 UTC.

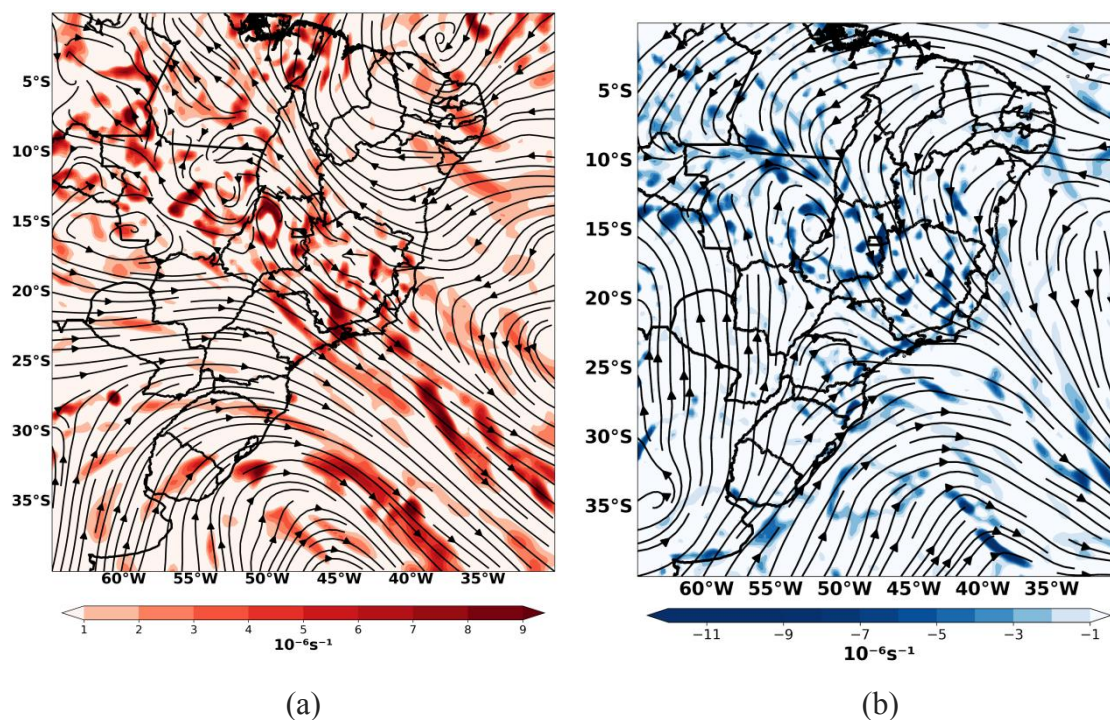
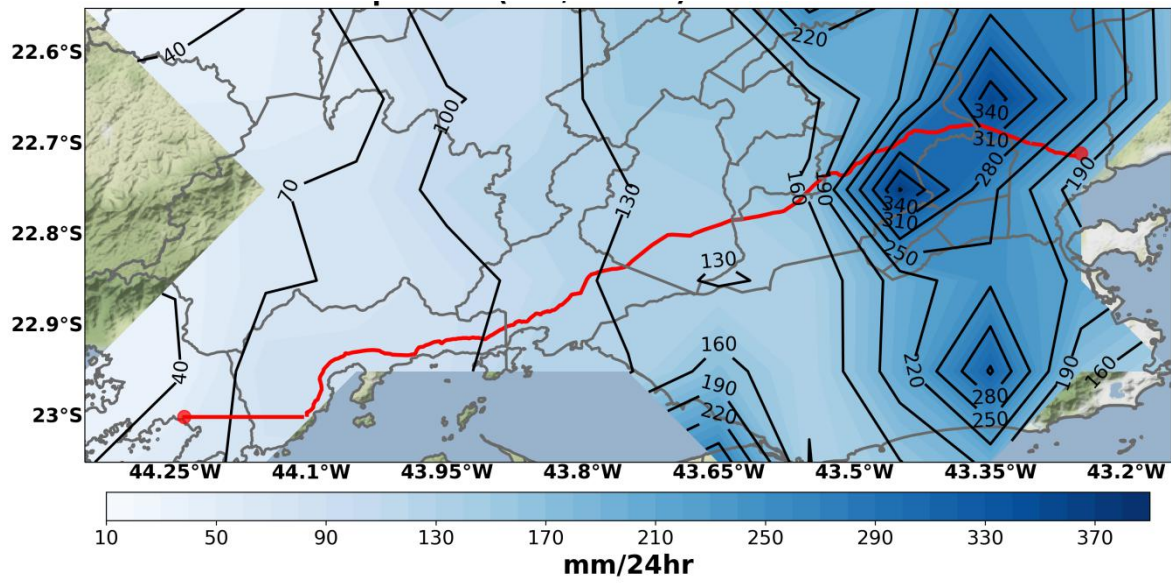
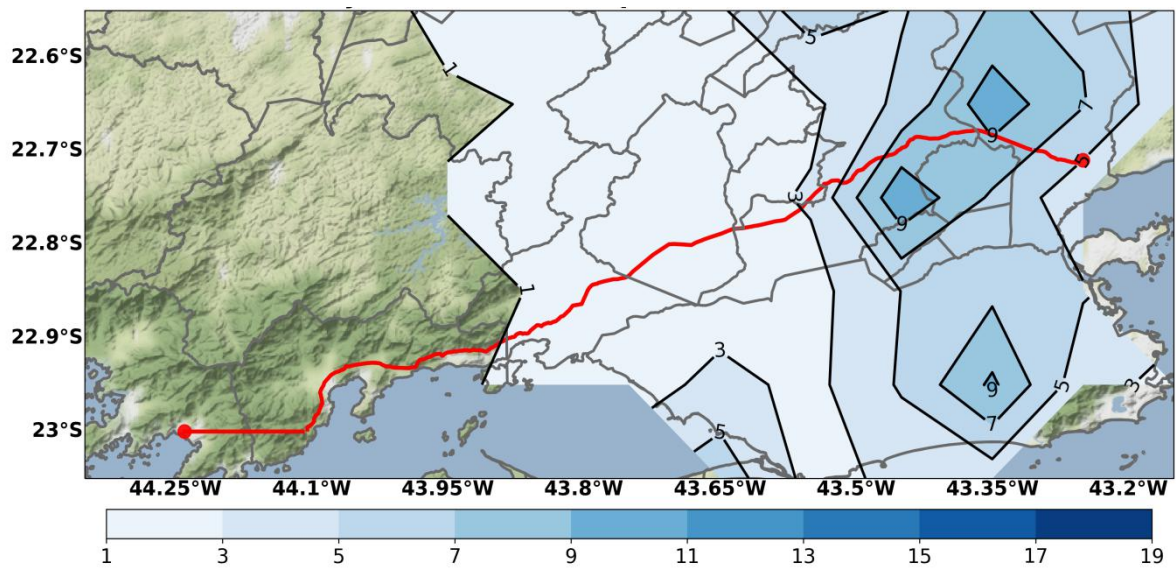


Figura 4.9 - (a) Campo de divergência do vento em 300 hPa ($10^{-6} \cdot s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 300 hPa em linhas de corrente (b) Campo de divergência do vento em 850 hPa ($10^{-6} \cdot s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 850 hPa em linhas de corrente. Campos do ERA-5 para o dia 03/02/2008 às 18:00 UTC.

No terceiro maior evento, ocorrido em 29 de março de 2001, a precipitação atingiu um máximo acumulado de 371,8 mm/dia (Figura 4.10a), sua amplitude em relação aos demais eventos está um pouco menor, com $A = 76,1\%$ da região, mas mesmo assim com grande impacto sobre o Rio de Janeiro (Figura 4.10b). O evento oriundo de uma ZCAS, afetou com grande volume de precipitação a região, pois a frente fria vinda de latitudes mais elevadas (Figura 4.12a), tornou-se estacionária por no mínimo quatro dias e sobre o Estado do RJ havia confluência de escoamento de NE, de NW e de SW (Figura 4.12a) (PEREIRA; MENEZES, 2004). Em 500 hPa, o Rio de Janeiro estava sob o setor Leste de um cavado muito bem configurado (Figura 4.12b), e em altos níveis configura-se um centro de alta pressão sobre Goiás, devido ao intenso aquecimento e consequente liberação de calor latente da convecção sobre o Brasil Central. Ademais, há a presença do ciclone próximo ao Nordeste do Brasil, feição típica de evento de ZCAS (Figura 4.13a). Além disso, houve a presença do jato subtropical na borda sul da alta pressão em torno de $30^{\circ}S$. Sendo importante ressaltar que o gradiente de temperatura é fraco, sendo mais marcante o gradiente de umidade (Figura 4.13b). Uma subsidência por compensação da convecção da ZCAS, a qual gera escoamento do ar, foi responsável pelo marcante gradiente de umidade.



(a)



(b)

Figura 4.10 - (a) Acumulado de precipitação diária (em cores e linhas de contorno preto - $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) e (b) anomalia de precipitação diária padronizada (em cores e linhas de contorno preto), para o dia 29/03/2001. As linhas vermelhas representam as transmissões do oleoduto.

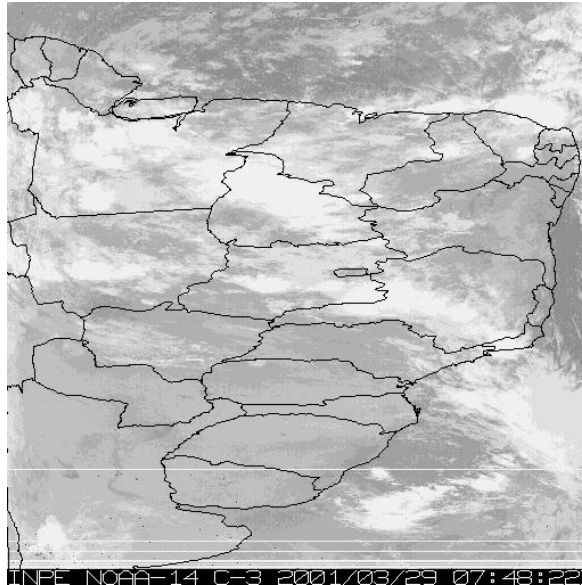


Figura 4.11 - Imagem do satélite NOAA-14 canal 3 (vapor d'água), do dia 29/03/2001 às 07:48 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.

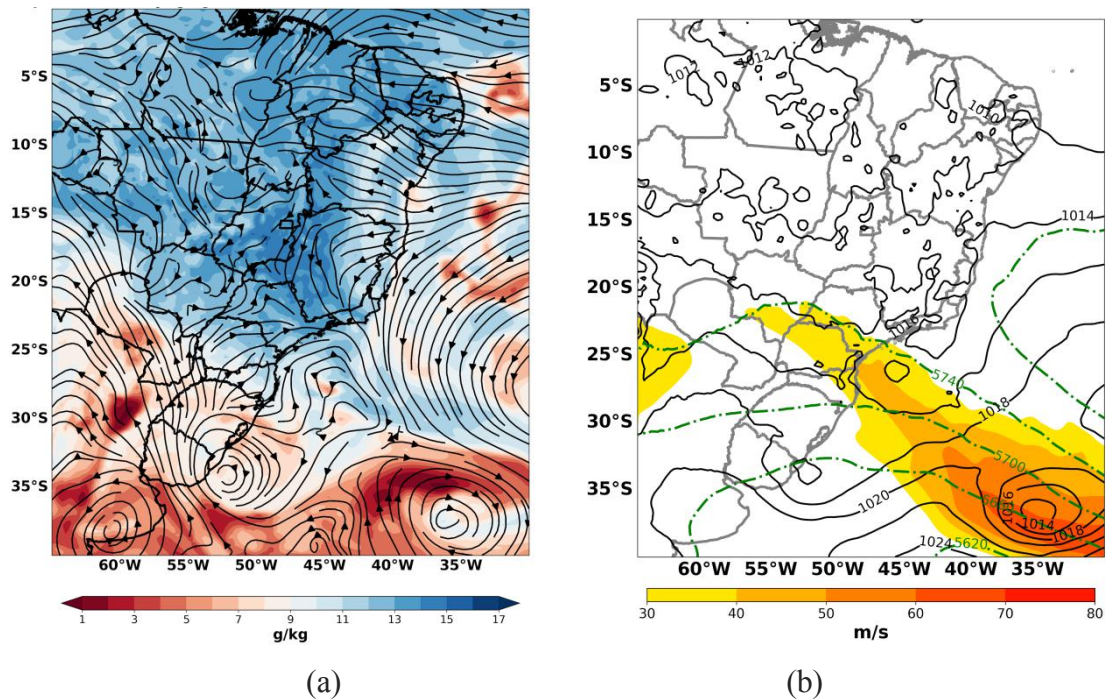


Figura 4.12 - (a) Campo de Umidade específica (g/kg) em escala de cores e vento em 850 hPa em linhas de corrente (m/s) (b) Pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas contínuas pretas, com altura geopotencial em 500 hPa ($\text{m} \cdot \text{g} \cdot 10^{-1}$) em linhas tracejadas em verde e magnitude do vento em 200 hPa (m/s) em escala de cores. Campos do ERA-5 para o dia 29/03/2001 às 18:00 UTC.

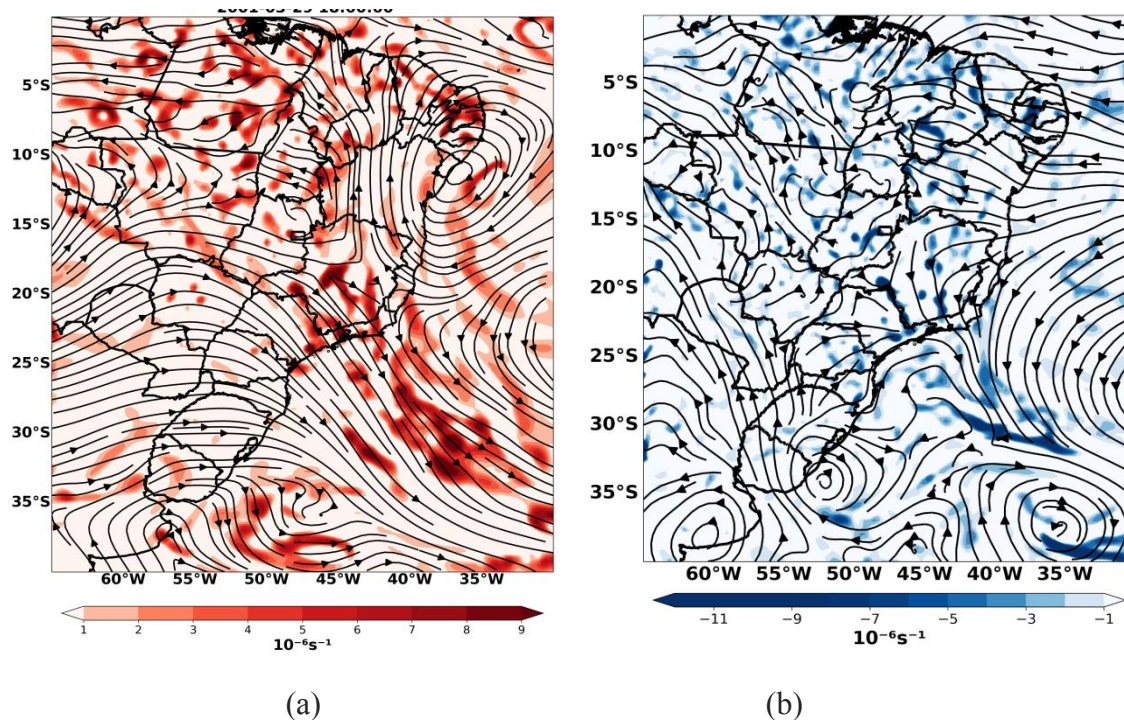


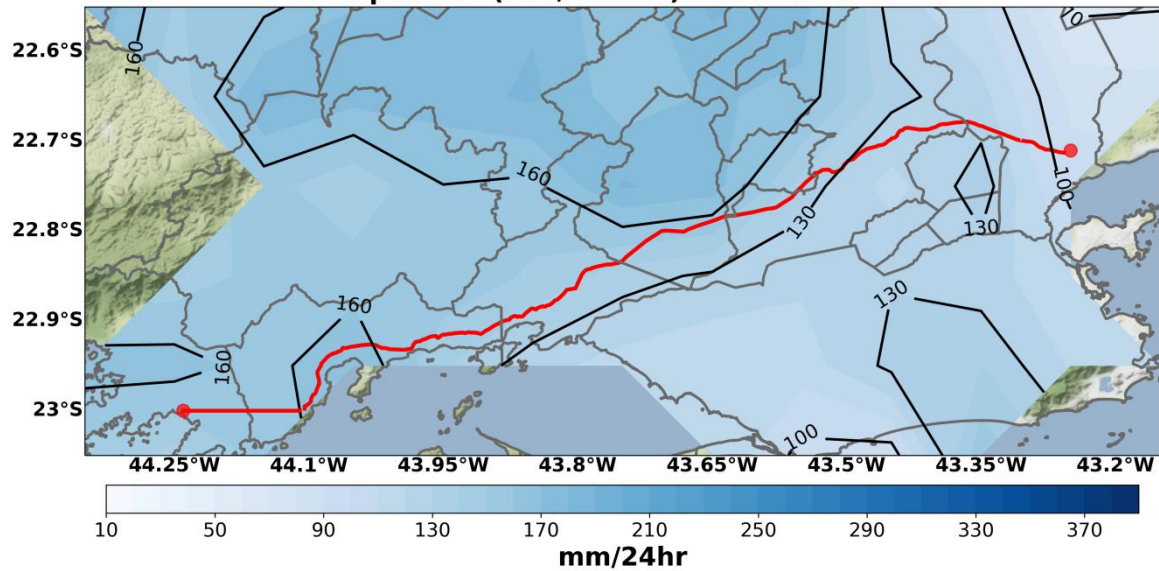
Figura 4.13 - (a) Campo de divergência do vento em 300 hPa ($10^{-6}.s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 300 hPa em linhas de corrente (b) Campo de divergência do vento em 850 hPa ($10^{-6}.s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 850 hPa em linhas de corrente. Campos do ERA-5 para o dia 29/03/2001 às 18:00 UTC.

O quarto e mais recente evento extremo, corresponde ao dia chuvoso de 3 de agosto de 2018, com um máximo de 184,3 mm/dia (Figura 4.14a). Segundo as notícias registradas, houve a morte de uma criança e três foram enterradas na lama. Na classificação, este evento ficou caracterizado com o quarto índice, pois teve $A = 95,5\%$ e $M = 2,54$ (Figura 4.14b), a precipitação ocorreu com menor intensidade, do que os casos de classificação superior, mas ocorreu de forma contínua o suficiente para surgir na classificação.

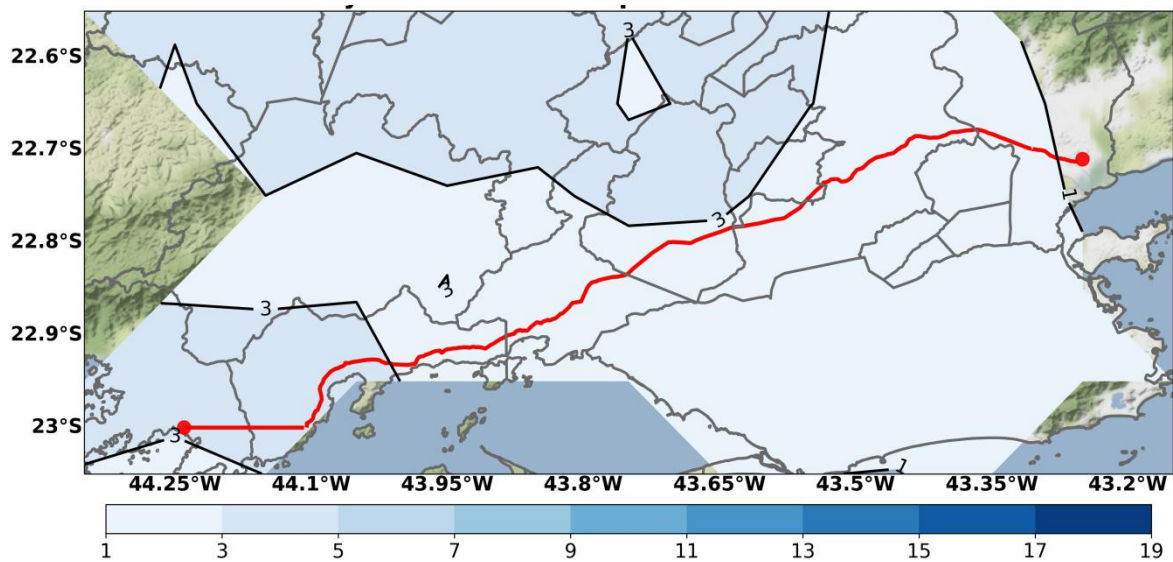
Este caso, diferente dos outros, ocorreu no inverno e manifestou um vento de Nordeste que transportava umidade da Região Oceânica (Figura 4.16a). E também, apresentou uma condição pós-frontal (Figura 4.16b), com o favorecimento da circulação de alta pressão transiente trazendo umidade. Esta condição, denominada chuva pós-frontal, depende da posição da borda da alta pressão, porque a aproximação da alta pressão permite que sistemas de microescala (nuvens convectivas) e mesoescala (brisas) atuem de forma mais acentuada (CAVALCANTI; CASTRO, 2004).

Em altos níveis, a corrente de jato em 200 hPa contribuiu para uma condição instável, com a posição da entrada equatorial do Jato Subtropical, sobre o oceano, próximo à costa de

São Paulo. O seu posicionamento favoreceu a divergência em altos níveis e consequentemente intensificou o movimento ascendente (Figura 4.17a e b), o que propiciou a formação de nuvens, que podem ser identificadas na Figura 4.15.



(a)



(b)

Figura 4.14 - (a) Acumulado de precipitação diária (em cores e linhas de contorno preto - $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) e (b) anomalia de precipitação diária padronizada (em cores e linhas de contorno preto), para o dia 03/08/2018. As linhas vermelhas representam as transmissões do oleoduto.

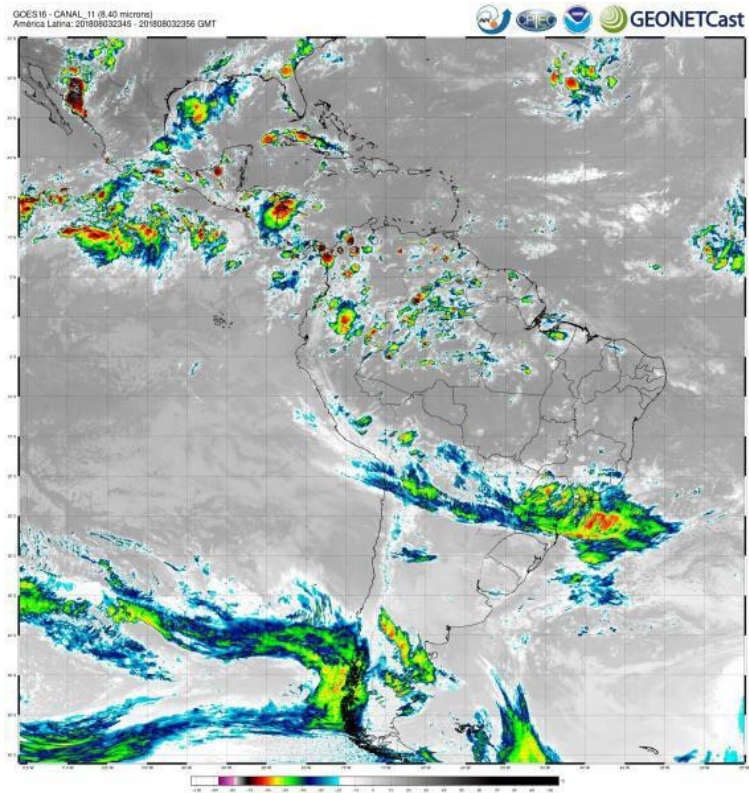
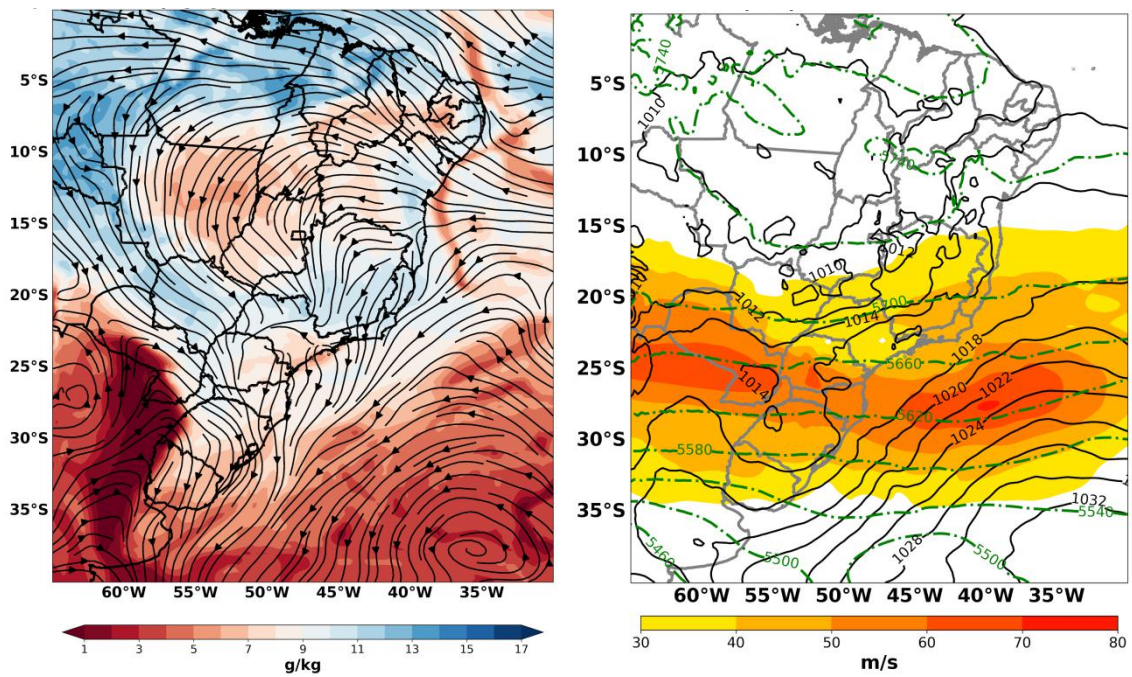


Figura 4.15 - Imagem do satélite GOES-16 canal 11 (infravermelho termal), do dia 03/08/2018 às 23:45 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.



(a)

(b)

Figura 4.16 - (a) Campo de Umidade específica (g/kg) em escala de cores e vento em 850 hPa em linhas de corrente (m/s) (b) Pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas contínuas pretas, com altura geopotencial em 500 hPa (m_{gp}.10⁻¹) em linhas tracejadas em verde e magnitude do vento em 200 hPa (m/s) em escala de cores.

Campos do ERA-5 para o dia 03/08/2018 às 18:00 UTC.

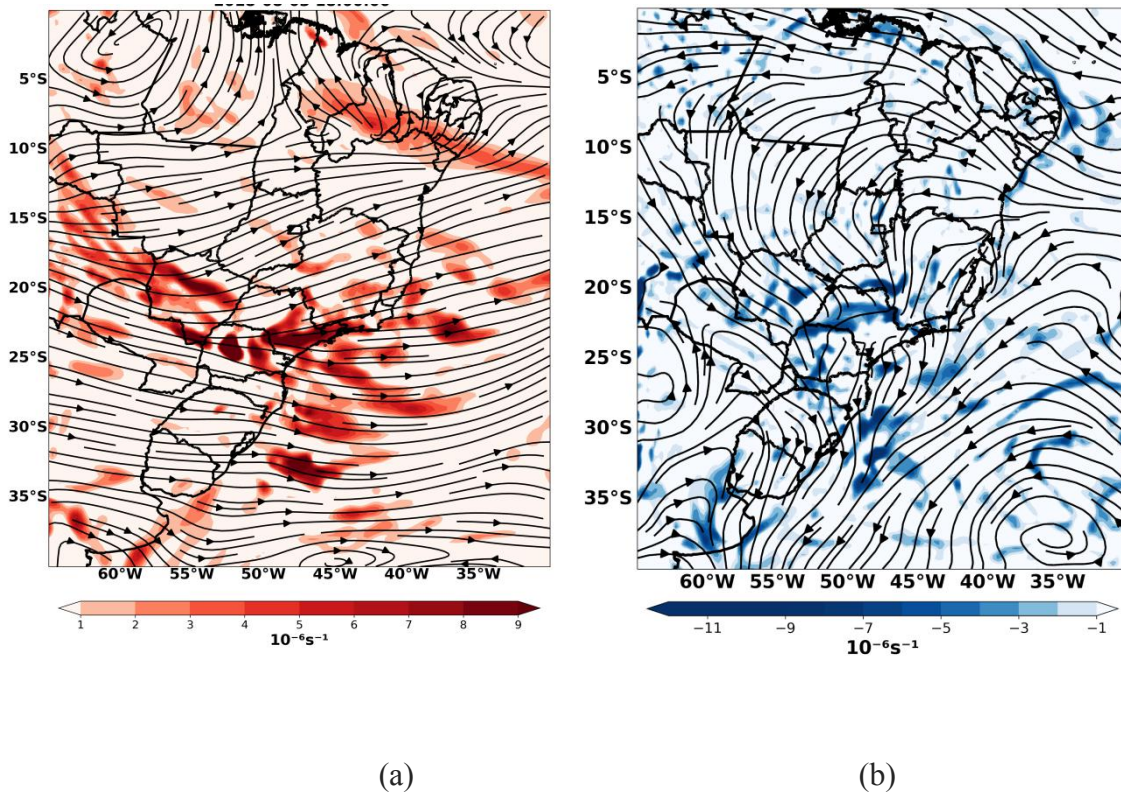
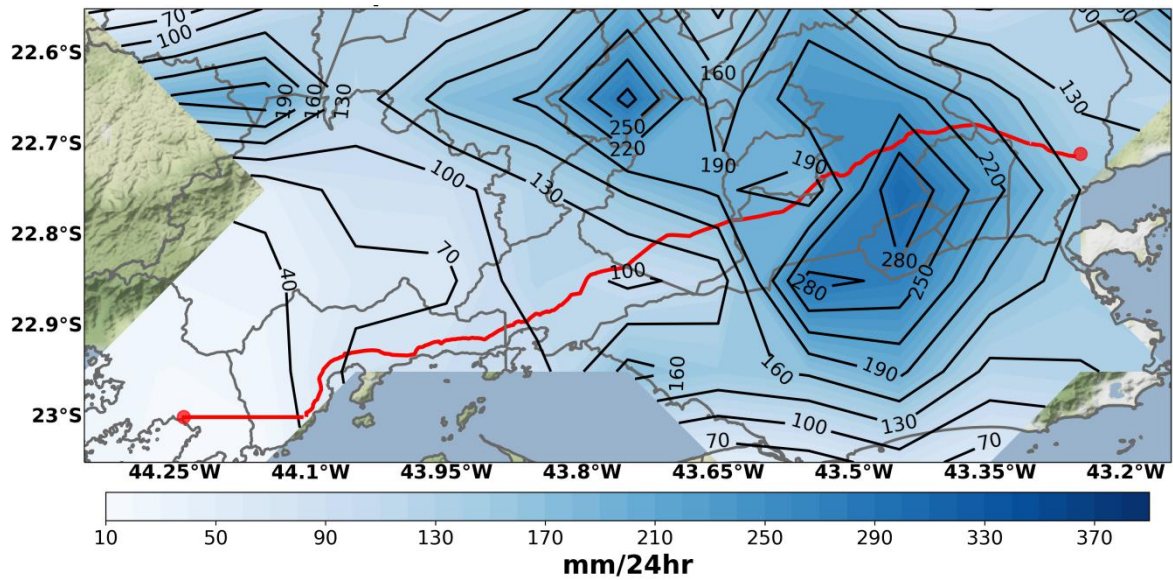


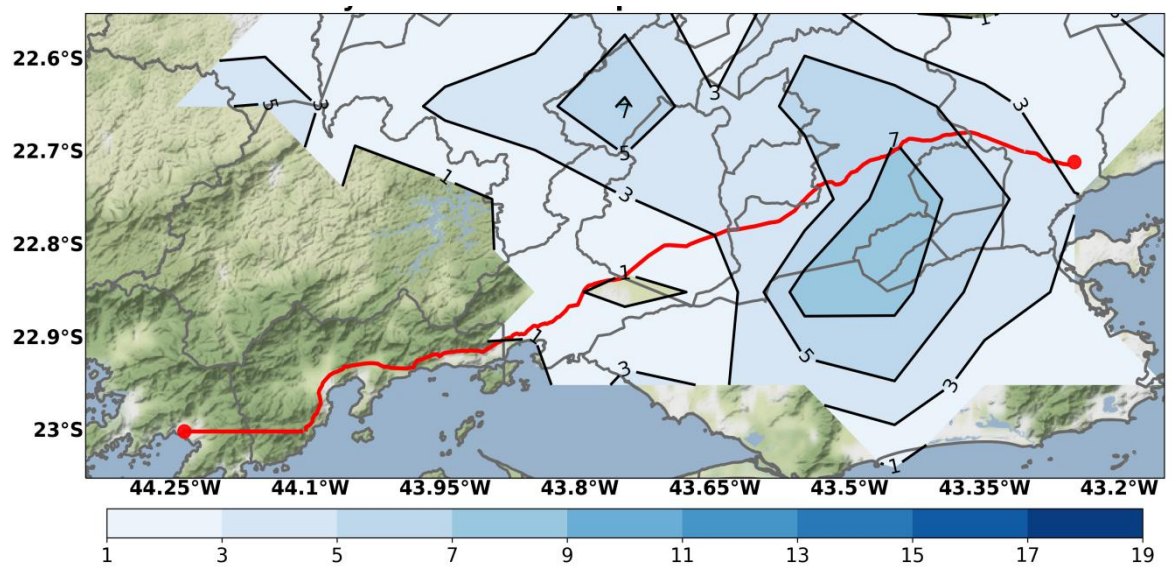
Figura 4.17 - (a) Campo de divergência do vento em 300 hPa (10⁻⁶.s⁻¹) em escala de cores e vento (m/s) em 300 hPa em linhas de corrente (b) Campo de divergência do vento em 850 hPa (10⁻⁶.s⁻¹) em escala de cores e vento (m/s) em 850 hPa em linhas de corrente. Campos do ERA-5 para o dia 03/08/2018 às 18:00 UTC.

No extremo de precipitação seguinte, o quinto evento da classificação, em 15 de março de 2010, no Rio de Janeiro houve um alto volume de precipitação de 309,5 mm/dia (Figura 4.18a), seguido quase imediatamente por inundações urbanas generalizadas e deslizamentos de terra, como perda de vidas, estimadas em dez fatalidades (LOTTERMANN; TRIGUEIRO, 2019). Esse evento não obteve maior destaque na classificação, pois afetou uma área relativamente pequena, apesar da intensidade (Figura 4.18b), e teve sua influência a partir da frente fria, marcada pelo gradiente geopotencial (linha verde na Figura 4.20b), com a sua origem vinda do Oceano Atlântico. A frente fria representou, nas Figuras 4.20 a e b, um conjunto composto por duas massas de ar de características termodinâmicas diferentes entre si, e um ciclone extratropical gerado pelo levantamento da massa de ar quente que sofreu a ação da força de Coriolis na escala sinótica. É importante ressaltar que os regimes de borda na

frente fria alinham nuvens cumulonimbus vigorosas (Figura 4.19 a e b), associada à chuvas fortes, granizos e raios, chegando a afetar a região continental. Esta condição de tempo produziu convergência dos ventos (Figura 4.21b), que também obteve suporte com o transporte de umidade do Noroeste (NW) da Amazônia, intensificando a instabilidade (Figura 4.20b).

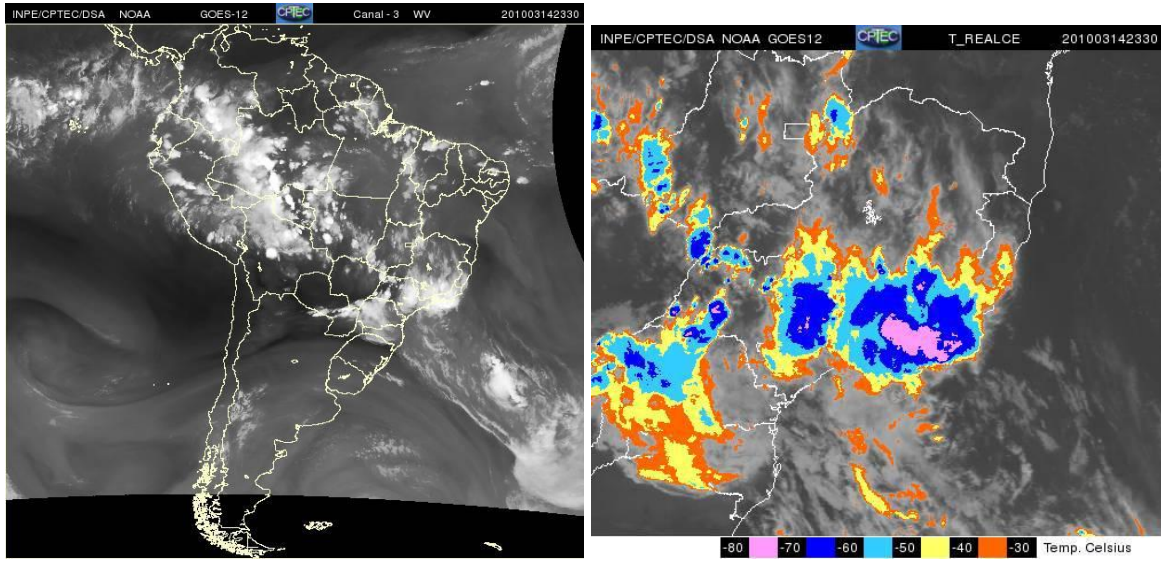


(a)



(b)

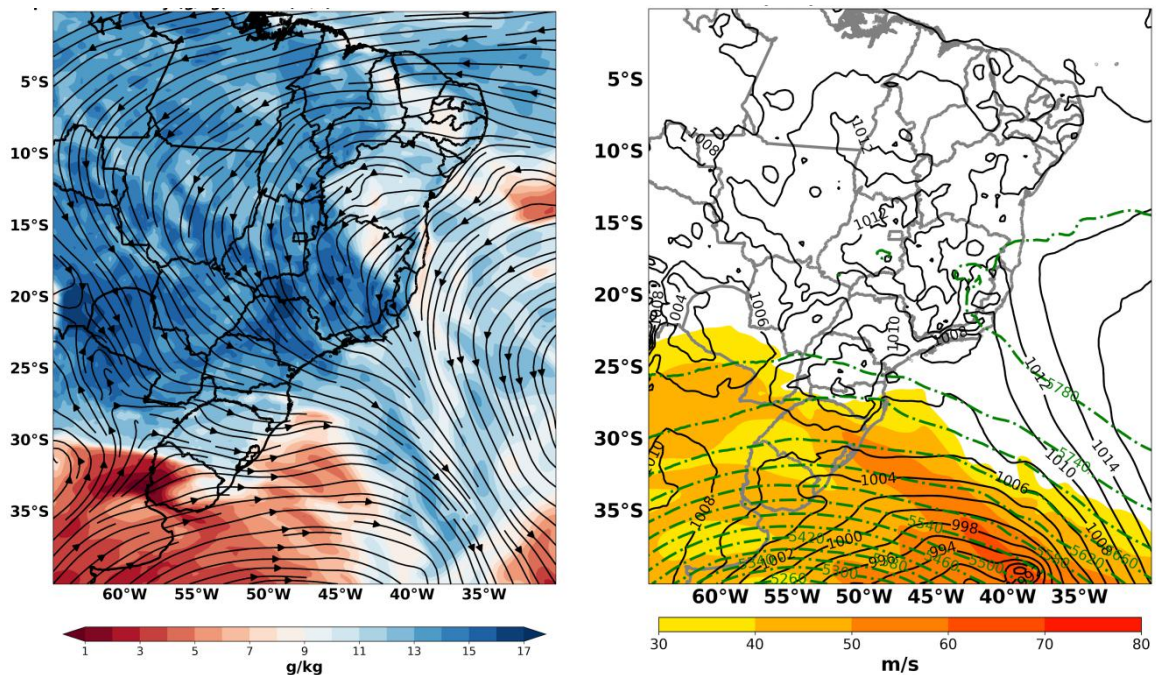
Figura 4.18 - (a) Acumulado de precipitação diária (em cores e linhas de contorno preto - mm.dia⁻¹) e (b) anomalia de precipitação diária padronizada (em cores e linhas de contorno preto), para o dia 14/03/2010. As linhas vermelhas representam as transmissões do oleoduto.



(a)

(b)

Figura 4.19 - Imagens do satélite GOES-12 (a) canal 3 (vapor d'água) (b) canal do infravermelho (realçado), do dia 14/03/2010 às 23:30 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.



(a)

(b)

Figura 4.20 - (a) Campo de Umidade específica (g/kg) em escala de cores e vento em 850 hPa em linhas de corrente (m/s) (b) Pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas contínuas pretas, com altura geopotencial em 500 hPa (m) em linhas tracejadas em verde e magnitude do vento em 200 hPa (m/s) em escala de cores.

Campos do ERA-5 para o dia 14/03/2010 às 18:00 UTC.

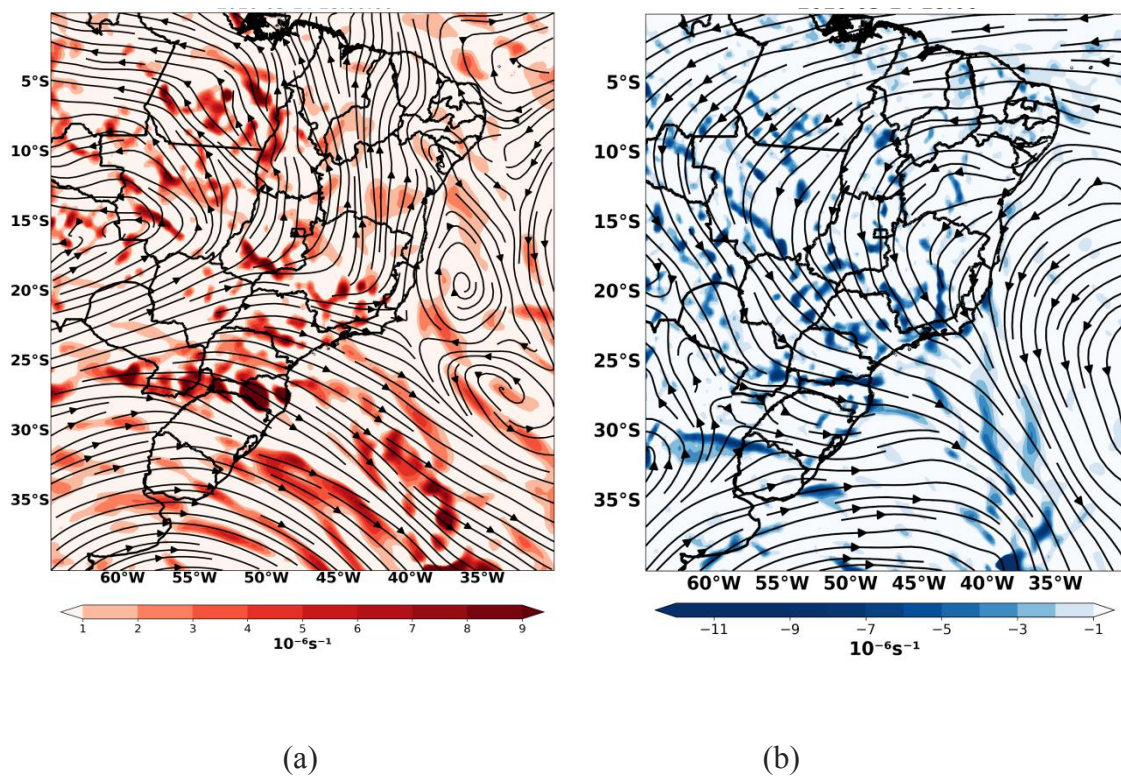


Figura 4.21 - (a) Campo de divergência do vento em 300 hPa ($10^{-6}.s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 300 hPa em linhas de corrente (b) Campo de divergência do vento em 850 hPa ($10^{-6}.s^{-1}$) em escala de cores e vento (m/s) em 850 hPa em linhas de corrente. Campos do ERA-5 para o dia 14/03/2010 às 18:00 UTC.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

O presente trabalho forneceu uma gama de conhecimento sobre a precipitação extrema, tanto no aspecto espacial quanto no temporal, que ocorreu ao longo do duto ORBIG no período de 20 anos, revelando por meio das informações de sensoriamento remoto as principais características desses eventos (intensidade e frequência).

Com a alta precisão do GPM, obteve-se a intensidade máxima da precipitação da região para o período do estudo, e também uma melhor compreensão dos extremos de chuva no oleoduto ORBIG. Por outro lado, a comparação entre os multi-sensores e as medidas diretas, forneceu a validação dos dados de precipitação, obtendo uma correlação de moderada a forte, dependendo da região e das escalas temporais.

A classificação dos eventos extremos de precipitação comprovou ser eficiente na detecção de locais mais suscetíveis na região do ORBIG a grandes volumes de chuva diária, e também acumulados de muitos dias. Esse acerto se deve ao fato da classificação não ser apenas por meio da magnitude do evento, mas também pela área afetada e por sua intensidade média. Como pôde ser observado nos resultados, foram encontrados casos mais extremos de chuva na região Sudoeste da área de estudo. A maioria dos eventos esteve associado à ZCAS (5 casos), frente frias (2 casos), sistemas de baixa pressão (2 casos) e pós-frontal (1 caso). Deve-se ressaltar que o estabelecimento dessas classificações eram independentes da ocorrência de fatores socioeconômicos significativos, conforme demonstrado pelos diferentes exemplos apresentados neste trabalho. Por fim, pôde-se identificar alguns fatores meteorológicos que preponderaram para a condição extrema de chuva, e então geram risco ao oleoduto ORBIG no Rio de Janeiro. Consistindo no aumento do calor no verão austral, encontrado em 9 dos 10 casos, conforme mencionado em outros trabalhos (BARCELLOS *et al.*, 2016), e também, o horário de maior frequência, com destaque para o fim da tarde, por ser considerado o período mais quente do dia, conforme Pellegati e Galvani (2010). Dos sistemas sinóticos, ficou evidente o risco que representa a ZCAS, sendo o principal gerador de picos de chuva. Sua instabilidade dinâmica, associada ao canal de transporte de umidade do Noroeste da Amazônia, orientada pela convergência dos ventos, favoreceu uma elevada concentração

de umidade dentro da área afetada, e produziu elevados acumulados de precipitação e um risco acentuado aos dutos (MICHAELSEN, 2011).

Outra importante informação extraída deste trabalho foi a análise de múltiplos dias, permitindo detectar a persistência de chuva, geradora de deslizamentos e inundações. Essa metodologia também mostrou que os extremos de precipitação em toda região do duto ORBIG predominam no verão austral e nas regiões montanhosas e costeiras. Este estudo também permitiu identificar as regiões mais vulneráveis, encontrando na região do ORBIG mais núcleos convectivos no município de Nova Iguaçu, com 4 registros nos dez maiores casos e o maior caso de chuva que se registrou sobre Mangaratiba, embora tenha sido o único registro.

Estas análises de variabilidade de precipitação extrema podem contribuir para a melhora na implementação de medidas de mitigação nos dutos, o que por consequência permite reduzir possíveis perdas e obter resiliência socioeconômica. Também melhora o conhecimento sobre os riscos aos dutos, e avalia de forma abrangente as chuvas mais extremas sobre o duto ORBIG do estado do Rio de Janeiro.

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional das Águas (ANA). Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso 12 de julho de 2019.

AMARAL JR., A. F. **Mapeamento Geotécnico Aplicado à Análise de Processos de Movimentos de Massa Gravitacionais: Costa Verde-RJ – Escala 1:10.000**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.

ANDRADE, K.M.; CAVALCANTI, I. F. A. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do Sul. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA 13. **Anais[...]** SBMET. Fortaleza- CE. 2004.

ANDRÉ, R. G. B.; MARQUES, V.; PINHEIRO, F. M. A.; FERRAUDO, A. S. Identificação de regiões pluviométricamente homogêneas no estado do Rio de Janeiro, utilizando-se valores mensais. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 23. n. 4. pp. 501-509, 2008.

ARAÚJO, I.T.; AMARAL, C. Geologia (de engenharia) de dutos terrestres nas regiões serranas do Rio de Janeiro. **Revista de Ciência, Tecnologia e Inovação**, Nº 5. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto de sistemas de transmissão e distribuição de gás combustível: NBR 12712**. Rio de Janeiro, 2002. p.78.

BARROS, V.; GONZALEZ, M.; LIEBMANN, B.; CAMILLONI, I. Influence of the South Atlantic Convergence Zone and South Atlantic sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in Southeastern South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 67, p. 123-133, 2000.

BARCELLOS, P. C. L.; AMARAL, I. C. F.; SILVA, F. P.; VISSIRINI, F. S. B, MAGALHÃES, C. A.; *et al.* Diagnóstico Meteorológico dos Desastres Naturais Ocorridos nos Últimos 20 Anos na Cidade de Duque de Caxias. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 31(3), p 319-329. 2016. DOI: 10.1590/0102-778631320150146.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional do Petróleo. **Anuário Estatístico Brasileiro, Gás Natural e Biocombustíveis 2010**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:<<http://anp.gov.br>>. Acesso 14 fevereiro de 2020.

BRESSANI, L. A. Instrumentação em obras geotécnicas: taludes e escavações. *In*: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 5., 2009, São Paulo. **Anais[...]** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2009.

CARVALHO, L. M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal activity. **Journal Climate** 17, p 88-108. 2004.

CAVALCANTI, I. F. A., CASTRO, C. C. Influências da variabilidade intrasazonal sobre a América do Sul em resultados de uma simulação climática com o MCGA CPTEC/COLA. *In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Anais[...]*Fortaleza, Out. 2004.

CHAMBRIARD, M. M. R.; BARROSO, W. M.; BISAGGIO, H. C. **Relatório de Investigação de Incidente na Válvula V-05 do Oleoduto ORBIG (Oleoduto Rio-Baía de Ilha Grande)**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). 2016.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, RS, 2006.

CORREIA, F.R.S. **Zonas de Convergência Subtropicais na América do Sul: Características da circulação e fluxos de umidade**. 2013. Monografia (Graduação em Meteorologia), IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

COUTINHO, S. V. A precipitação e sua influência na movimentação de massa: estudo de um caso. **Health and Environment Journal**, v. 3, n. 2, 2002.

DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; MEDINA, A. I.M.; SILVA, C. R.; PIMENTEL, J., LUMBRERAS, J. F.; CALDERANO, S. B. **Diagnóstico Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, 2000.

DAVIS, E.; NAGHETTINI, M. C. **Estudo de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro**. 2 ed. revista e ampliada. Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, 2000.

D'ORSI, R. N. **Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da Serra dos Órgãos da Rodovia Federal BR-116 RJ (Estrada Rio-Teresópolis)**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

ESFORD, F.; PORTER, M.; SAVIGNY, W. A risk assessment model for pipelines exposed to geohazards. *In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 5th., Anais[...]* Calgary.- CA: American Society of Mechanical Engine, 2004.

GADÊLHA, A.N. **Análise da Missão Gpm (Global Precipitation Measurement) na Estimativa da Precipitação Sobre Território Brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2018.

GALVANI, E.; AZEVEDO, T. R. A frente polar atlântica e as características de tempo associadas: Estudo de caso. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA E APLICADA. Anais[...]* 2003. Rio de Janeiro. UERJ. 2003.

GONÇALVES, M. G. **Mapeamento automático de cicatrizes de deslizamentos em regiões montanhosas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

GUSMÃO FILHO, J. A. Chuva e deslizamentos nas encostas ocupadas. *In: WORKSHOP A METEOROLOGIA E OS RECURSOS HÍDRICOS APLICADOS À DEFESA CIVIL. Anais[...]*. Recife, 1997.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; *et al.* The ERA5 Global Reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. Vol.146, Is. 730. p 1999-2049. 2020. DOI: 10.1002/qj.3803.

IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012. p.582.

JUNKER, N.W; GRUMM, R.H.; HART, R.; BOSART, L.F.; BELL, K.M.; PEREIRA, F.J. Use of standardized anomaly fields to anticipate extreme rainfall in the mountains of Northern California. **Weather Forecasting**. 2008. 23: 336–356

KIDD, C.; HUFFMAN, G. Meteorological Applications. **Global Precipitation Measurement**, 2011. v. 18, n. 3, p. 334–353.

KIDDER, S. Q.; HAAR, T. H. V. **Satellite Meteorology: An Introduction**. Copyright by Academic Press. 1995. *United Kingdom Edition published*. 24-28. ISBN 0-12-406430-2.

KASPAR, M.; MULLER, M. Selection of historic heavy large-scale rainfall events in the Czech Republic. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. 2008. 8:1359–1367.

LI, Z. *et al.* Multiscale Hydrologic Applications of the Latest Satellite Precipitation Products in the Yangtze River Basin using a Distributed Hydrologic Model. **Journal of Hydrometeorology**, 2015, v. 16, n. 1, p. 407–426.

LIMA, P. H. M. **O índice de eficiência de drenagem como subsídio à análise espacial de áreas suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

LOTTERMANN, A.; TRIGUEIRO, A. M. **Chuva do Rio é a mais forte em 22 anos, Segundo dados do Alerta Rio**. 2019. Technical report. Disponível em:<<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2019/04/09/chuva-do-rio-e-a-mais-forte-em-22-anos-segundo-dados-do-alerta-rio.ghtml>>. Acesso 25 janeiro de 2020.

MARENGO, J. A.; CAVALCANTI, I. F. A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; BONATTI, J. P.; *et al.* Ensemble simulation of regional rainfall features in the CPTEC/COLA atmospheric GCM. Skill and predictability assessment and applications to climate predictions. **Climate Dynamics**, 21, 459-475, 2003.

MENDONÇA, F ;DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: Noções básicas e clima do Brasil**. Ed. Contexto. Curitiba, 2007.

MICHAELSEN, F. M. **Riscos geotécnicos em dutos: instrumentação para monitoramento de oleodutos e gasodutos em encostas instáveis**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre, 2011.

MONTEIRO, J. B.; ZANELLA, M. E. Eventos pluviométricos extremos e impactos associados em Fortaleza/Brasil: uma análise a partir da técnica dos quantis. *In: EXPERIMENTOS EM CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA*, Mato Grosso do Sul: UFGD, 2014. pp. 165 – 184.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E.; TORRES, R.; ANDERSON, S. P.; *et al.* Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall. **Water Resources Research**, v. 33, pp. 91- 109, 1997.

NASA. **README Document for the GPM Data**. *In: GODDARD EARTH SCIENCES DATA AND INFORMATION SERVICES CENTER (GES DISC)*. 2017. Disponível em:<<http://disc.gsfc.nasa.gov>>. Acesso 10 janeiro de 2020.

NERY, J. T.; MALVESTIO, L. Natural Disasters in Southeastern Brazil Associated with the South Atlantic Convergence Zone. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. 2017.

NOGUEIRA JR., J.; MARQUES, A. S. **Linhas de Transmissão e Dutos**. ed. Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE. cap. 30, p.475-485, 1998.

OLIVEIRA, H. R. **Gerenciamento da integridade de dutos: proposta de abordagem aos riscos geotécnicos em gasodutos de transmissão**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005

OLIVEIRA, E. M. G. **Parametrizações Convectivas no Modelo WRF e sua Relação com a Precipitação Durante Ciclogêneses no Sudeste da América do Sul**. 2014. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

OLIVEIRA, R. *et al.* Characteristics and diurnal cycle of GPM rainfall estimates over the Central Amazon region. **Remote Sensing**, v. 8, n. 7, 2016.

OMM. **Guia de Prática Hidrológica**. Vol. I - Hidrologia. A Medição das Informações Hidrológicas. 2011.

PELLEGATTI, C.H.G.; GALVANI, E. **Avaliação da Precipitação na Serra do Mar-Sp em Eventos de Diferentes Intensidade e Duração**. GEOUSP - Espaço e Tempo, São Paulo, n 27, pp. 147-158, 2010.

PEREIRA, T. R. A, MENEZES, W. F. Estudo Preliminar da Frequência de Sistemas Sinóticos que Atingem o Estado do Rio de Janeiro. *In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Anais [...]*. 2004; Fortaleza. Ceará: Sociedade Brasileira de Meteorologia; 2004.

PEREIRA, M.; SPAUTZ, D.; SILVA, A. **Deslizamentos de terra no Rio deixam nove mortos**. 2008. Technical report. Disponível em: <<https://www.nsctotal.com.br/noticias/deslizamentos-de-terra-no-rio-deixam-nove-mortos>>. Acesso 04 fevereiro de 2020.

PEREIRA, M.; COLÔNIA, J. D.; GARCÍA, H. A Mitigation technique to reduce pipeline strains in unstable slopes. *In: 8th RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION. Anais [...]*, Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2011.

PESSOA, T. A. **LOGÍSTICA BRASILEIRA: um estudo teórico do Modal Dutoviário.** 2016. Monografia (Graduação de Administração). UFPB. João Pessoa, 2016.

PORTER, M.; LOGUE, C.; SAVIGNY, W.; ESFORD, F.; BRUCE, I. Estimating the influence of natural hazards on pipeline risk and system reliability. *In: 5th INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE. Anais [...]*, 2004. Calgary-CA:American Society of Mechanical Engineers, 2004.

RAIMUNDO, C. C.; SANSIGOLO, C. A.; MOLION, L. C. B. Tendências das Classes de Precipitação na Região Metropolitana de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.3, 397 - 408, 2014. DOI: 10.1590/0102-778620130655

RAMOS AM, TRIGO RM, LIBERATO MLR. A ranking of high-resolution daily precipitation extreme events for the Iberian Peninsula. **Atmos. Sci. Lett.** 2014. DOI: 10.1002/asl2.507.

RAMOS, A.M.; TRIGO, R.M.; LIBERATO, M.L.R. Ranking of multi-day extreme precipitation events over the Iberian Peninsula. **Int. J. Clim.** 2017, 37, 607–620.

RODRIGUES, A. F.; POLIVANOV, H.; SILVA J. X.; OLIVEIRA, W. J. Avaliação geotécnica e ambiental da zona de influência do duto petrolífero no município de mangaratiba (rj), com a utilização da técnica de avaliação do terreno. *In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. Anais [...]*. Salvador. 2005.

SANDRONI, S. Instrumentação geotécnica para monitoramento de tubulações de aço que atravessam “línguas coluviais” no Sudeste brasileiro. *In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA. Anais [...]* São Paulo. 2004.

SARAIVA, J. M. B.; SCAGLIONI, T. P. Climatologia dos Sistemas Precipitantes para o Período de Fevereiro a Dezembro de 2003, no Rio Grande do Sul. *In: CONFERENCE: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Anais [...]* Fortaleza, Vol. I.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L. **South America. In: Meteorology of the Southern Hemisphere.** Eds. Karoly D. J.; Vicent, D. G. American Meteorological Society, Meteorological Monographs, 1998. v. 27, n. 49, p. 119-139.

SILVA, F. D. S.; PEREIRA FILHO, A. J.; HALLAK, R. **Classificação de sistemas meteorológicos e comparação da precipitação estimada pelo radar e medida pela rede telemétrica na bacia hidrográfica do Alto Tietê.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 24, n. 3, pp. 292-307, 2009.

SOARES, A. **Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente**. 2ª ed. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2006. p. 214.

SOARES, E. P. **Caracterização da precipitação na região de Angra dos Reis e a sua relação com a ocorrência de deslizamentos de encostas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

SOARES, J.; MUSMAN, J. V. R. Estabilização e Monitoramento de Encosta em Solo Coluvionar na Serra do Mar. *In: III CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. Anais [...]* Rio de Janeiro: Perfect Press, 2001. 577 p. p. 571-577.

SATGÉ, F. *et al.* Comparative assessments of the latest GPM mission's spatially enhanced satellite rainfall products over the main bolivian watersheds. **Remote Sensing**, v. 9, n. 4, p. 1–16, 2017.

SCHIAVI, M.T.; HOFFMANN, W.A.M. 2015. Cenário Petrolífero: Sua Evolução, Principais Produtores e Tecnologias. **Revista Digital Bibliotecon. Cienc. Inf.** Campinas, SP v 13, n 2, p 259-278.

SELUCHI, M. E.; BEU, C. M. L.; ANDRADE, K. M. Características das Frentes Frias com Potencial para Provocar Chuvas Intensas na Região Serrana do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**. Ano 12 – Vol. 18. p. 361-376. 2016. DOI: 10.5380/abclima.v18i0.45369.

SELUCHI, M. E.; BEU, C. M. L.; ANDRADE, K. M. Características das Frentes Frias Causadoras de Chuvas Intensas no Leste de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, 25-37, 2017. DOI:10.1590/0102-778632120150095.

SERRÃO, E.A.O.; WANZELER, R.T.S.; SANTOS, C.A.; GONÇALVES, L.J.M. Avaliação estatística entre as estimativas de precipitação da constelação GPM com satélite TRMM: Uma análise na bacia hidrográfica do Rio Solimões. **Revista Brasileira de Climatologia**. v 18. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43059>.

SILVA, C.A.M.D. Os Desastres no Rio De Janeiro: Conceitos e Dados. **Cadernos do Desenvolvimento Fluminense**, Rio de Janeiro, p 55–71. 2015. doi 10.12957/cdf.2015.26555.

SIQUEIRA, R. A. D.; VILA, D. Hybrid methodology for precipitation estimation using Hydro-Estimator over Brazil. **International Journal of Remote Sensing**. v.40(11), p 4244-4263. 2019.

TANG, G. et al. Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 152–167, 2016.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M. Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e deslizamentos aplicados à encosta da serra

do mar. *In*: 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA. **Anais [...]** v. 2, pp. 237-248 São Paulo, 1987.

TEODORO, T. A.; PASSOS, R. B.; SILVA, B. A.; SILVA, B. C. Análise das Estimativas da Precipitação Diária do Produto GPM-IMERGna Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**. v. 43, n. 2, 2020.

TRANSPETRO. Mapa dos dutos e terminais operados pela Transpetro. Disponível em: <<http://www.transpetro.com.br>>. Acesso 10 março 2020.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

VIEIRA, R.; FURTADO, S. M. Caracterização dos aspectos físico-naturais intrínsecos da encosta e identificação das áreas susceptíveis a deslizamentos na sub-bacia do Ribeirão Araranguá – Blumenau/SC. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS. **Anais[...]**, Florianópolis: GEDN/UFSC, pp. 337-351, 2004.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Academic Press; 3rd Edition - ISBN: 9780123850225. 1995.