



**Universidade Federal de Itajubá**  
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas



Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos  
PROFÁGUA

Eliny Rodrigues Fonseca

**Análise das estimativas de precipitação baseadas em satélites para estudo  
de eventos extremos na Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba/MG**



Itabira - Minas Gerais

2022

Eliny Rodrigues Fonseca

**Análise das estimativas de precipitação baseadas em satélites para estudo de eventos extremos na Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba/MG**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos. Linha de pesquisa: Ferramentas aplicadas aos instrumentos de gestão de recursos hídricos.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Carolina Vasques Freitas

Coorientador: Dr. Alexandre Miguel Urbano da Fonseca Ramos

Itabira – Minas Gerais

2022

Eliny Rodrigues Fonseca

**Análise das estimativas de precipitação baseadas em satélites para estudo de eventos extremos na Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba/MG**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos. Linha de pesquisa: Ferramentas aplicadas aos instrumentos de gestão de recursos hídricos

Orientadora: Prof. Dr. Ana Carolina Vasques Freitas

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Coorientador: Dr. Alexandre Miguel Urbano da Fonseca Ramos

Instituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa: Lisboa, PT

Banca Examinadora:

---

Dr. Marcus André Fuckner

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

---

Profª. Dra. Eliane Maria Vieira

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas / Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Itabira – Minas Gerais

2022

## DEDICATÓRIA

Dedicado ao meu pai Geraldo Anastácio Fonseca (*in memoriam*).

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ser apoio e fortaleza em todas os momentos da minha vida.

A Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e todo corpo docente pelos ensinamentos e aprendizados durante todo o curso.

Aos meus orientadores, Ana Carolina e Alexandre, pela paciência, pelo apoio, por orientar, por motivar e colaborar.

A minha família por ser base e fonte de gratidão sempre. Em especial a memória do meu pai Geraldo que se juntou a Deus este ano.

Ao meu marido Renato pela compreensão, carinho e amor de sempre.

Aos amigos que fiz durante o curso, em especial aos Vips por motivar, ajudar e sempre nos apoiarmos um nos outros.

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

“Você nunca sabe a força que tem.  
Até que sua única alternativa é ser forte”.

*Johnny Depp*

## RESUMO

FONSECA, Eliny Rodrigues. *Análise das estimativas de precipitação baseadas em satélites para estudo de eventos extremos na Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba/MG*. 2022. 97 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2022.

As mudanças climáticas podem modificar o ciclo hidrológico resultando em alterações na intensidade e variabilidade das precipitações, as quais, por sua vez, podem levar a ocorrência de desastres naturais, conflitos de uso da água, além de outros impactos socioeconômicos e ambientais. Para um melhor planejamento, gerenciamento e regulação dos recursos hídricos diante desses desafios, pode-se destacar os estudos hidrometeorológicos que são importantes para compreender acerca da disponibilidade e uso da água, analisar as ocorrências e previsão de eventos extremos, entre outros. Neste contexto, os dados pluviométricos utilizados nesses estudos são essenciais, uma vez que, quanto maior a quantidade, cobertura e precisão, maior a probabilidade de acerto nas previsões. Todavia, o Brasil possui uma deficiência de dados obtidos em solo por vários motivos, aumentando o interesse e a necessidade de se buscarem fontes de dados alternativas, tais como as estimativas de precipitação baseadas em satélites, para tentar minimizar essas deficiências e realizar um melhor planejamento hídrico. Diante disso, este trabalho avalia o desempenho das estimativas de precipitação oriundas de alguns produtos de satélites meteorológicos na Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba/MG, afluente do Rio Doce, verificando seu potencial de utilização como uma alternativa para aplicação em estudos de eventos hidrológicos extremos e como uma ferramenta para o planejamento e gestão hídrica. Para isso foi realizada uma análise comparativa, entre os dados de precipitação das estações pluviométricas e os obtidos por meio de satélites meteorológicos, utilizando indicadores estatísticos. Os dados das estações pluviométricas foram obtidos por meio da plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Os dados pluviométricos dos satélites TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) e CMORH (CPC Morphing Technique) foram obtidos por meio das suas respectivas plataformas. Foram elaborados mapas pluviométricos para a bacia utilizando ferramentas de geoprocessamento e também avaliadas as estimativas dos satélites durante eventos extremos de precipitação, relacionando-os com os impactos socioambientais, descritos nos documentos oficiais do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2id) do Ministério do Desenvolvimento Regional, bem como os mecanismos meteorológicos associados. Os resultados deste estudo mostraram que o TRMM e o IMERG apresentaram melhores resultados em relação ao CMORPH quando se compara com as precipitações das estações pluviométricas, podendo auxiliar no planejamento de sistemas de infraestrutura hídrica para a redução dos impactos de inundações e secas em cenários de escassez de dados e informações pluviométricas.

**Palavras-chave:** Gestão hídrica, sensoriamento remoto, eventos extremos.

## ABSTRACT

FONSECA, Eliny Rodrigues. *Analysis of precipitation estimates based on satellites to study extreme events in the Piracicaba River Basin/MG*. 2022. 97 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Itabira, Minas Gerais, 2022.

Climate change can modify the hydrological cycle resulting in changes in the intensity and variability of rainfall, which, in turn, can lead to the occurrence of natural disasters, conflicts in the use of water, in addition to other socioeconomic and environmental impacts. For better planning, management and regulation of water resources in the face of these challenges, it is possible to highlight the hydrometeorological studies that are important to understand about the availability and use of water, analyze the occurrences and perform the forecast of extreme events, among others. In this context, the rainfall data used in these studies are essential, since the greater the quantity, coverage and precision, the greater the probability of correct predictions. However, in Brazil there is a lack of ground observations both in terms of temporal and spatial coverage. For this reason, there is a need to look for other sources of precipitation data such as satellite-based estimates to try to complete these failures and to carry out better water planning. Therefore, this work intends to evaluate the performance of precipitation estimates from meteorological satellites in the Hydrographic Basin of the Piracicaba River/MG, Doce River sub-basin, in order to verify its potential use as an alternative for application in studies of extreme hydrological events and as a tool for water planning and management. For this, an analysis will be carried out using statistical indicators which will compare the data from observational pluviometric stations and precipitation data from satellite products. The data of the pluviometric stations will be obtained through the Hidroweb platform of the National Water and Sanitation Agency. The precipitation data from TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) and CMORH (CPC Morphing Technique) satellite products will be obtained through their respective platforms. Rainfall maps were prepared for the basin using geoprocessing tools and satellite estimates were also evaluated during extreme precipitation events, relating them to the socio-environmental impacts, described in the official documents of the Integrated Disaster Information System (S2id) of the Ministry of Development Regional, as well as the associated meteorological mechanisms. The results of this study showed that the TRMM and IMERG presented better results in relation to CMORPH when compared to rainfall stations, adding to the planning of water infrastructure systems to reduce the impacts of floods and droughts in scenarios of scarcity of data and rainfall information.

**Keywords:** Water management, remote sensing, extreme events.

## LISTA DE FIGURAS

	Representação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) com base na imagem do satélite GOES-12 para o dia 22/01/2011 às 00Z.....	25
<b>Figura 1</b>		
<b>Figura 2</b>	Representação dos tipos de órbitas.....	30
<b>Figura 3</b>	Satélite TRMM e seus instrumentos.....	33
<b>Figura 4</b>	Ilustração da constelação de satélites GPM.....	35
<b>Figura 5</b>	Imagem da estimativa de precipitação global do dia 17/01/2021 às 17:30 hs por meio dos dados do IMERG.....	36
<b>Figura 6</b>	Imagem da estimativa de precipitação global do dia 08/09/2017 às 09:00 hs por meio dos dados do CMORPH.....	38
<b>Figura 7</b>	Localização da UPGRH do rio Piracicaba/MG.....	40
<b>Figura 8</b>	Municípios que compõem a UPGRH do rio Piracicaba/MG.....	40
<b>Figura 9</b>	Mapa Topográfico da UPGRH do rio Piracicaba/MG.....	42
<b>Figura 10</b>	Mapa com a localização de todas as estações pluviométricas utilizadas neste estudo.....	49
<b>Figura 11</b>	Gráficos com a regressão linear das 10 estações preenchidas.....	50
<b>Figura 12</b>	Gráficos da análise de consistência das estações preenchidas.....	52
<b>Figura 13</b>	Análise de precipitação do dia 15/01/2003.....	55
<b>Figura 14</b>	Análise de precipitação do dia 16/01/2003.....	56
<b>Figura 15</b>	Análise de precipitação do dia 15/12/2005.....	56
<b>Figura 16</b>	Análise de precipitação do dia 21/12/2013.....	57
<b>Figura 17</b>	Análise de precipitação do dia 22/12/2013.....	58
<b>Figura 18</b>	Análise de precipitação do mês de janeiro/2003.....	59
<b>Figura 19</b>	Análise de precipitação do mês de dezembro/2005.....	59
<b>Figura 20</b>	Análise de precipitação do mês de dezembro/2013.....	60
<b>Figura 21</b>	Análise ponto a pixel para a média dos 19 anos de precipitação acumulada mensal (mm/ano) .....	62
<b>Figura 22</b>	Análise Pixel a Pixel entre as estações e o TRMM.....	63
<b>Figura 23</b>	Análise Pixel a Pixel entre as estações e o CMORPH.....	65
<b>Figura 24</b>	Análise Pixel a Pixel entre as estações e o IMERG.....	66
<b>Figura 25</b>	Análise interanual entre as estações e o IMERG.....	67

<b>Figura 26</b>	Análise interanual entre as estações e o TRMM.....	68
<b>Figura 27</b>	Análise interanual entre as estações e o CMORPH.....	68
<b>Figura 28</b>	Análise da precipitação média interanual (mm/ano) entre a estações e os produtos de satélites.....	69
<b>Figura 29</b>	Mapas da distribuição espacial da precipitação média acumulada mensal (mm/mês) para os 19 anos da série histórica analisada para (a) TRMM, (b) CMORPH, (c) IMERG e (d) estações pluviométricas.....	70

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b>	Intervalo de classificação dos resultados para o Pbias ou viés relativo	61
-----------------	---	----

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Estações meteorológicas na bacia do rio Piracicaba/MG utilizadas neste estudo.....	48
<b>Tabela 2</b>	Estações meteorológicas externas à bacia do rio Piracicaba/MG utilizadas neste estudo.....	49
<b>Tabela 3</b>	Municípios com ocorrência de eventos extremos na bacia do rio Piracicaba/MG para o período deste estudo.....	53
<b>Tabela 4</b>	Análise da precipitação observada nas estações meteorológicas para os eventos extremos selecionados	54
<b>Tabela 5</b>	Análise ponto a pixel da precipitação média anual.....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BDMEP	Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa
<i>CDO</i>	<i>Climate Data Operators</i>
CDR	Registro de Dados Climáticos
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CP	Correlação de Pearson
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CSAV	<i>Cloud System Advection Vector</i>
DAEE/SP	Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo
EPAGRI/SC	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
GPM	<i>Global Precipitation Measurement</i>
GSMaP	<i>Global Satellite Mapping of Precipitation</i>
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IMERG	<i>Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IRD	<i>Institut de Recherche pour le Développement</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
MSWEP	<i>Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PARH	Plano Integrado de Recursos Hídricos
PERSIANN	<i>Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks)</i>
REMQ	Raiz do Erro Quadrático Médio
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
SEDEC	Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
S2id	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres
SOE	Superintendência de Operações e Eventos Críticos

TMPA	<i>TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UPGRHs	Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	18
2.1	Geral.....	18
2.2	Específicos.....	18
<b>3</b>	<b>RELEVÂNCIA/JUSTIFICATIVA</b> .....	19
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
4.1	Eventos Hidrometeorológicos Extremos.....	21
4.2	Fatores influentes na precipitação.....	23
4.3	Instrumentação hidrometeorológica.....	26
4.4	Estimativas de precipitação por Satélites.....	28
4.4.1	Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).....	32
4.4.2	Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG).....	34
4.4.3	CPC Morphing Technique (CMORPH).....	38
<b>5</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	41
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	45
6.1	Dados pluviométricos observados.....	45
6.2	Dados dos satélites.....	46
6.3	Dados dos eventos extremos.....	46
6.4	Organização e Análise dos dados.....	47
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	50
7.1	Avaliação dos dados das estações pluviométricas.....	50
7.2	Análise de eventos extremos.....	55
7.3	Análise comparativa da precipitação em escala anual.....	63
7.3.1	Comparação Ponto a Pixel.....	63
7.3.2	Comparação Pixel a Pixel.....	66
7.4	Análise comparativa da precipitação em escala interanual.....	72
7.5	Análise da distribuição espacial da precipitação.....	76
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	78
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	80
	<b>APÊNDICE A</b> .....	89

## 1 INTRODUÇÃO

A água é fundamental para a manutenção da vida na Terra e é imprescindível para o desenvolvimento socioeconômico em uma determinada região ou bacia hidrográfica. Assim, é importante conhecer o ciclo hidrológico, uma vez que este é o mais importante componente do sistema terrestre. O ciclo hidrológico é composto em sua forma mais simples por mecanismos que movimentam a água em suas diferentes fases, tais como a precipitação, o escoamento superficial, a infiltração, a evaporação e a transpiração.

Para que a precipitação, objeto desse estudo, seja formada, são necessárias algumas condições. Estas condições podem ser descritas como: o ar sendo resfriado até atingir a saturação, o vapor d'água condensado formando gotículas, e essas gotículas aumentando seu tamanho até que adquiram dimensões suficientes para precipitarem na forma de chuva (VON SPERLING, 2005). Chuvas rápidas, intensas e concentradas em pequenas áreas tem o potencial de resultar em graves danos materiais e humanos.

Os desastres naturais mais recorrentes no Brasil são os resultantes tanto da água em abundância (movimento de massa, inundações, enxurradas), os quais causam os maiores impactos, quanto da sua falta (estiagem, seca). A recorrência e a magnitude dos principais desastres que ocorrem no país estão relacionados, especialmente, às mudanças no clima, ao processo de urbanização acelerado e desmatamento que ocorreu nas últimas décadas, e que levou à uma ocupação desordenada do solo. Devido a isto, as populações mais vulneráveis e em áreas de risco sofrem com os inúmeros impactos que esses eventos podem causar (CEMADEN, 2021).

Para que exista uma política pública efetiva na redução dos riscos e impactos associados aos desastres, é primordial o conhecimento e monitoramento constante das variáveis meteorológicas, especialmente a precipitação, por meio da utilização de ferramentas e tecnologias que também permitam, com razoável antecedência, a previsão e emissão de alertas com o intuito de minimizar as consequências dos eventos climáticos extremos. O acompanhamento e a previsão meteorológica e climática só é possível a partir da disponibilidade de dados meteorológicos, sendo que quanto maior a quantidade, cobertura e precisão destes dados, melhor é a qualidade das previsões. Além disso, os dados pluviométricos fornecem subsídios para as decisões políticas concernentes ao uso racional dos recursos hídricos disponíveis, tendo em vista uma avaliação de riscos hidrometeorológicos.

Contudo, a cobertura espacial e temporal deficiente em termos de dados pluviométricos faz com que a gestão dos recursos hídricos seja um grande desafio no Brasil. Uma rede de dados em solo é capaz de mapear o padrão espacial de precipitação de forma muito pobre, especialmente sobre topografia complexa, uma vez que a cobertura fornecida pelos pluviômetros não é homogênea. Neste contexto, tem havido um crescente interesse nas medições pluviométricas baseadas em satélites, pois estas podem preencher as lacunas observacionais e garantir a cobertura contínua de dados espaciais e temporais de alta resolução.

Entretanto, atualmente existem poucos estudos avaliando qual produto de precipitação por satélite é mais apropriado para analisar eventos de precipitação extrema e em um contexto de bacias hidrográficas no Brasil. Portanto, esta pesquisa pretende avaliar alguns produtos de satélites meteorológicos de alta resolução e verificar se eles são capazes de fornecer estimativas confiáveis de precipitação, especialmente durante episódios de chuvas extremas na região da bacia do Piracicaba, estado de Minas Gerais. Os resultados deste trabalho poderão subsidiar o planejamento de sistemas de infraestrutura hídrica para a mitigação dos impactos de inundações e secas.

Além disso, este estudo é aderente à área de concentração “Instrumentos da Política de Recursos Hídricos” e está em concordância com a linha de pesquisa “Ferramentas aplicadas aos instrumentos de gestão de recursos hídricos”, pois os resultados obtidos permitirão a proposição de ferramentas adequadas à escassez de dados e informações pluviométricas, podendo contribuir para subsidiar a melhoria na gestão dos recursos hídricos na bacia do Piracicaba e também servir de modelo para estudos similares em outras regiões do país.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar o desempenho das estimativas de precipitação oriundas de produtos de satélites meteorológicos na bacia do rio Piracicaba em Minas Gerais, de modo a verificar seu potencial de utilização como uma alternativa para aplicação em estudos de eventos hidrológicos extremos e como uma ferramenta para o planejamento e gestão hídrica.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar uma análise comparativa, utilizando indicadores estatísticos, entre os dados de precipitações estimadas por meio de produtos de satélites meteorológicos (TRMM, IMERG e CMORPH) e os registros das redes pluviométricas disponíveis em solo na bacia hidrográfica do rio Piracicaba/MG;
- Realizar análise espacial dos índices pluviométricos das microbacias afluentes do rio Piracicaba/ MG utilizando ferramentas de geoprocessamento;
- Avaliar as estimativas dos satélites durante eventos extremos de precipitação ocorridos no período de 2000 a 2019 e associar aos impactos socioambientais relatados no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres – S2iD nas áreas de riscos das microbacias do Rio Piracicaba/MG, bem como os sistemas meteorológicos deflagradores.

### 3 RELEVÂNCIA/JUSTIFICATIVA

A variabilidade espacial e temporal pluviométrica, especialmente na região Sudeste do Brasil, condiciona atividades econômicas importantes, tais como a agropecuária, indústria, geração de energia elétrica, além do abastecimento humano. Os dados pluviométricos fornecem subsídios para as decisões políticas concernentes à melhor gestão dos recursos hídricos disponíveis.

As mudanças de temperatura da atmosfera e o balanço de radiação se relacionam diretamente com o ciclo hidrológico. O aquecimento global da atmosfera pode trazer consequências ambientais como mudanças nos padrões da precipitação (aumento da intensidade e da variabilidade da precipitação), podendo acometer expressivamente a disponibilidade e a distribuição temporal da vazão nos rios, tanto de modo positivo como negativo (ANA, 2010).

As incertezas, em virtude das mudanças climáticas, são um dos grandes desafios para estudos relacionados a variabilidade dos extremos climáticos em diferentes escalas espaciais e temporais. Esses eventos extremos de precipitação são responsáveis por um número relevante de desastres naturais, incluindo deslizamentos de terra, inundações e destruição de materiais, além dos impactos socioeconômicos, especialmente os óbitos, e também os custos para reestruturar as áreas e as vidas atingidas, fazendo com que essa temática desperte interesse de órgãos e de diferentes atores envolvidos (SILLMANN *et al.*, 2017; HÉNIN *et al.*, 2018).

Portanto, a compreensão sobre as precipitações em uma bacia hidrográfica é essencial para se planejar, gerenciar e regular os recursos hídricos, visto que seu conhecimento pode contribuir para estudos relacionados a controle de inundações, uso e ocupação do solo, modelagem hidrológica, eventos extremos de seca, balanço hídrico e especificação do clima (LOUZADA, 2016).

Contudo, a gestão dos recursos hídricos atualmente sofre com uma cobertura espacial e temporal deficiente em termos de dados pluviométricos. Além disso, as mudanças climáticas no Brasil tendem a intensificar as dificuldades de acesso a água e a consequente competição por recursos hídricos, potencializando crises e conflitos com graves consequências devido ao uso inadequado desses recursos. Desta forma, os estudos hidrológicos são importantes, pois permitem retratar melhor a realidade da disponibilidade e uso dos recursos hídricos nas bacias, bem como estudos da ocorrência e previsibilidade de eventos extremos de secas e chuvas. Para

tanto, é fundamental a utilização de séries hidrológicas de boa qualidade, isto é, séries representativas, coerentes e estacionárias, com longo período de dados.

Neste contexto, estimativas de precipitação baseadas em satélites podem contribuir para preencher as lacunas deixadas por uma escassa rede de estações pluviométricas em solo. Portanto, esta pesquisa pretende avaliar as estimativas de precipitação por satélite de alta resolução durante episódios de chuvas extremas na região da bacia do Piracicaba. Espera-se que os resultados deste trabalho contribuam para a formação de uma base de dados pluviométricos que supra a cobertura espacial e temporal deficiente na região de estudo, e para o atendimento a uma das demandas da Unidade Organizacional da Superintendência de Operações e Eventos Críticos (SOE) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que é o “Planejamento de sistemas de infraestrutura hídrica para a mitigação dos impactos de inundações e secas”, conforme proposta ao Prof.Água.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Eventos Hidrometeorológicos Extremos

As múltiplas interações entre a terra e o clima, nas diversas escalas espaciais e temporais, juntamente com o aquecimento antropogênico das últimas décadas, têm originado transformações nas zonas climáticas, como resultado da diminuição do gradiente de temperatura equador-polo. Com isso, são previstos novos padrões climáticos; mais quentes nas regiões tropicais, e com o deslocamento na direção dos polos de zonas climáticas das latitudes médias e altas, e para cima nas regiões de maior altitude (IPCC, 2020). Dessa forma, segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2020), essas regiões ficarão cada vez mais sujeitas a temperaturas e chuvas extremas, em razão das alterações da sua estrutura, composição e funcionamento.

Os eventos extremos de seca podem ser definidos como um período prolongado (meses ou anos) em que a precipitação é menor que a média, resultando em escassez de água (Cunha *et al.*, 2019). Em contrapartida, os eventos extremos de chuva são estabelecidos pela precipitação intensa em um intervalo curto de tempo e/ou incidência contínua em dias consecutivos, causando grandes impactos econômicos e sociais, afetando e comprometendo o abastecimento de água, se comparado a outros fenômenos atmosféricos (REIS *et al.*, 2018; CARVALHO, JONES e LIEBMANN, 2002).

Os impactos causados pelas chuvas intensas nas áreas urbanas podem ser originados por sistemas de drenagem ineficientes e incapazes de receber grandes quantidades de precipitação. As áreas rurais também podem sofrer agravos com as fortes chuvas, causando a perda de safras, sendo indispensável, portanto, as previsões meteorológicas precisas durante episódios de chuvas extremas (LIMA, SATYAMURTY e FERNÁNDEZ, 2009).

No Sudeste do Brasil, a defesa civil, no decorrer da estação chuvosa, adota medidas preventivas e realiza planos de contingência para diminuir as consequências das chuvas intensas. As fortes precipitações, principalmente nesta região, durante o verão, são originadas por duas perturbações atmosféricas relevantes, a incursão das Frentes Frias e a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (LIMA, SATYAMURTY e FERNÁNDEZ, 2009).

O Estado de Minas Gerais, no que tange a aspectos climatológicos, se encaixa no regime de Monção da América do Sul, onde a maior parte da precipitação acontece ao longo de meados da primavera a meados do outono do ano seguinte; logo, esse é o período mais oportuno para a ocorrência de eventos extremos de precipitação (CAMPOS *et al.*, 2016). Ademais, em virtude da topografia complexa do Estado, junto as serras do Espinhaço e da Mantiqueira, existe a contribuição de circulações locais que interferem no clima local (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Assim, por causa da sua localização geográfica, o Estado de Minas Gerais é influenciado por fenômenos meteorológicos de latitudes médias e tropicais, apresentando, portanto, características de um clima de transição, em que as estações podem ser distinguidas entre seca e chuvosa, e onde frentes frias predominam ao longo de todo o ano. Além disso, o Estado é um significativo produtor de alimentos, e abriga rios essenciais para a geração de energia elétrica e grande capacidade turística, sendo essas atividades vulneráveis a eventos extremos (ABREU, 1998; NATIVIDADE, GARCIA e TORRES, 2017).

Um dos grandes desafios do Estado e da Defesa Civil é o período chuvoso, o qual requer muita atenção e planejamento estratégico para que as ações sejam efetivas, de modo a atender as emergências e fortalecer as ações de enfrentamento dos problemas originados pelos eventos de precipitação intensa. No decorrer deste período podem ocorrer desastres de natureza geológica, meteorológica e hidrológica, tais como deslizamentos, inundações, alagamentos, enxurradas, vendavais, granizo, dentre outros, que podem estar associados a grande diversidade natural do Estado, com regiões áridas, outras irrigadas, morros e relevos planos, constituindo um desafio para a Defesa Civil (PLANO DE EMERGÊNCIA PLUVIOMÉTRICA, 2018).

De acordo com Castro (1999), desastre pode ser entendido como o efeito de eventos trágicos, naturais ou antrópicos, sobre um ecossistema suscetível, ocasionando danos humanos, materiais e ambientais, e resultando também em perdas econômicas e sociais; sendo que o desastre é quantificado em termos da intensidade dos danos e prejuízos. Segundo o autor, para que ocorra um desastre é indispensável que aconteça um evento adverso, quantificado em termos de magnitude, com uma dimensão capaz de interagir com o sistema receptor (cenário do desastre), gerando danos e prejuízos estimáveis; além de haver também nesse cenário, áreas vulneráveis às decorrências dos eventos adversos.

Neste contexto, Castro (1999) considera vulnerabilidade como uma “condição intrínseca dos cenários de desastres e das comunidades em risco que, em interação com a magnitude dos

eventos adversos, define o nível de intensidade dos desastres”. Esta intensidade, segundo o autor, depende muito mais do grau de vulnerabilidade do que da magnitude de eventos adversos. Os episódios de inundação também podem estar relacionados a forma geométrica de uma bacia hidrográfica, a qual pode indicar maiores e menores tendências para eventos de enchentes e inundações. Com base no fator forma, por exemplo, pode-se determinar a propensão da bacia a inundações usando a associação entre a largura média e o comprimento axial da bacia. Considerando o fator densidade de drenagem, pode-se medir a velocidade com que a água sai da bacia hidrográfica indicando a permeabilidade relativa do terreno, sendo que terrenos impermeáveis devem exibir uma rede de drenagem consistente (SANTOS, 2012; SILVA *et al.*, 2020).

Minas Gerais, tanto quanto o Brasil, enfrenta problemas de desigualdade social e a falta de gerenciamento dos problemas socioambientais, colocando uma parte de sua população em risco. Muitos desses moradores vivem, por exemplo, em áreas de risco, tais como nas encostas ou margens de rios, ficando vulneráveis a eventos como enchentes e desmoronamentos. Concomitante a esta situação, a falta de políticas públicas ou a implementação delas de forma parcial ou inadequada, somada ao desordenado crescimento das áreas urbanas, têm motivado pesquisas relativas à temática dos eventos climáticos extremos e as suas consequências na região estudada (NATIVIDADE, GARCIA e TORRES, 2017). Diante disso, é importante ressaltar quais são os fatores que dão condições para a formação da precipitação, que podem se diferenciar de acordo com cada região.

#### **4.2 Fatores influentes na precipitação**

A precipitação é um dos componentes principais do ciclo hidrológico, pois compõe a matéria-prima das descargas dos rios e da recarga dos aquíferos. Pode ser considerada precipitação a chegada da água na superfície da terra em estado líquido (chuva ou chuvisco/garoa) ou sólido (granizo, saraiva e neve), como consequência da condensação do vapor d’água (TORRES e MACHADO, 2008).

De acordo com Feitosa *et al.* (2008), a precipitação é um evento inconstante que se altera no espaço e no tempo. Segundo os autores, para que ela aconteça, são necessárias várias etapas, tais como: presença de massas de ar com temperatura igual à do ponto de orvalho; posteriormente, essas massas de ar devem passar pelo processo de condensação adquirindo as formas líquida (gotículas de água) ou sólida (cristais de gelo); em seguida, deve acontecer o

crescimento das gotas de água (cristais de gelo), por meio de processos de colisão e coalescência (agregação e aderência), para originar gotas de chuva (flocos de neve ou pedras de granizo), as quais precisam ser de tamanho suficiente para que, ao saírem das nuvens, atinjam a superfície do solo, sem que evaporem.

Na região Sudeste do Brasil o principal tipo de precipitação que ocorre é a chuva, em decorrência da localização da maior parte do país na zona intertropical, sendo que a distribuição da pluviosidade se deve, principalmente, às propriedades geográficas da paisagem (disposição do relevo), a dinâmica dos sistemas atmosféricos atuantes, e às grandes variações inter e intra-anual e espacial (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

Cavalcanti *et al.* (2009) destacam que a topografia, a forma e a disposição do relevo são aspectos importantes para o entendimento dos vários tipos climáticos presentes na região Sudeste do Brasil. Segundo os autores, o gradiente altitudinal desta região varia desde o nível do mar até níveis superiores a 2.000 metros, o que influencia os padrões de temperatura e precipitação.

Existem alguns fatores que interferem na caracterização do clima de uma região, tais como a latitude e altitude, a continentalidade e a maritimidade, a vegetação, os solos, a disposição do relevo, as correntes marítimas, e também a interferência antrópica (TORRES e MACHADO, 2008).

Segundo Cavalcanti *et al.* (2009), a região Sudeste do Brasil possui grandes diferenças em termos do panorama climatológico, em função da sua posição latitudinal e por estar na borda do oceano, apresentando uma “transição entre os regimes permanentemente úmidos do Brasil Meridional e alternadamente secos e úmidos do Brasil Central”. Segundo os autores, a maritimidade/continentalidade influencia nas condições de temperatura e na disponibilidade de umidade na região, exibindo caráter transicional nos níveis zonais, por ser atravessada pelo Trópico de Capricórnio, e regional, por ser uma faixa de conflito entre sistemas tropicais e extratropicais, que estão sob o controle da dinâmica da frente polar.

A estação chuvosa em grande parte da região Centro-Oeste e no Sudeste do Brasil se inicia, em média, na segunda quinzena de outubro, sendo que as chuvas mais intensas e frequentes ocorrem entre dezembro e fevereiro, e em meados de março e começo de abril, a atividade convectiva intensa perde forças sobre a região tropical (LLOPART, 2012).

A principal causa das precipitações extremas na região Sudeste, no verão do hemisfério sul, está associada a um escoamento convergente de umidade na baixa troposfera, chamada de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Este sistema, definido por ser uma banda de nebulosidade persistente na direção noroeste-sudeste, se estendendo desde o centro-sul da Amazônia, regiões Centro-Oeste e Sudeste, centro-sul da Bahia, norte do Paraná, expandindo em direção ao Oceano Atlântico sudoeste (Figura 1), regula a precipitação ao longo do verão na América do Sul e é imensamente importante para a previsão de tempo e clima (LLOPART, 2012; PEDRO, FREITAS e BELLOTI, 2020).

Figura 1: Representação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) com base na imagem do satélite GOES-12 para o dia 22/01/2011 às 00Z.



Fonte: INPE/CPTEC (2020).

Uma das principais consequências da atuação da ZCAS são a ocorrência de eventos de alta pluviosidade, uma vez que este sistema permanece estacionário por, no mínimo quatro dias, sobretudo no final da primavera e nos meses de verão, promovendo, muitas vezes, desastres naturais devido às fortes e constantes chuvas, com impactos diretos nos meios físicos, bióticos e antrópicos do sudeste brasileiro (PEDRO, FREITAS e BELLOTI, 2020).

As fortes chuvas podem gerar estragos durante o período de verão, ocasionando enchentes, deslizamentos de terra, raios, vendavais e granizo, podendo resultar em danos aos serviços essenciais, tais como a distribuição de energia elétrica, o abastecimento de água, o saneamento

e a saúde da população, em locais onde a drenagem é inadequada para absorver os impactos de chuvas extremas em um curto período de tempo, sendo que, nestes casos, as previsões meteorológicas precisas são primordiais para conter e prever esses eventos (LIMA, SATYAMURTY e FERNÁNDEZ, 2009). Sendo assim, existem alguns instrumentos que quantificam a precipitação e podem servir de suporte para essas previsões.

### **4.3 Instrumentação hidrometeorológica**

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2020), os dados de precipitação são uma ferramenta fundamental para a gestão de recursos hídricos, além de influenciar, no âmbito econômico, o planejamento energético do país, a irrigação, navegação e indústria, e também possibilitar o dimensionamento de projetos, manutenção e operação de infraestrutura hidráulica de pequeno e grande porte, como barragens, drenagem pluvial urbana, bueiros e telhados. Ademais, o monitoramento pluviométrico permite acompanhar a ocorrência de eventos hidrológicos considerados críticos, tais como inundações e secas, e planejar medidas de mitigação dos impactos decorrentes desses eventos.

Em algumas regiões a complexidade do comportamento dos processos hidrológicos é um dos maiores problemas da hidrologia. Essa dificuldade ocorre pelo baixo número de estações presentes na rede hidrometeorológica e a ausência de dados consistentes, resultando em grandes desafios para a elaboração de estudos e projetos que dependam destes dados, como no caso da gestão de recursos hídricos (MACIEL *et al.*, 2019).

Para a obtenção de medidas diretas de precipitação, são utilizados instrumentos denominados pluviógrafos e pluviômetros. Para as medições em superfície, o pluviômetro é o aparelho mais habitual de monitoramento de precipitações no Brasil, por ser simples de se instalar e operar, e também por ter baixo custo. O pluviômetro é um recipiente que acumula a chuva e faz a leitura da lâmina d'água acumulada em determinado período de tempo (VASQUES, 2007; ALMEIDA, 2017).

O pluviógrafo possui a vantagem, em relação ao pluviômetro, de possibilitar a determinação da intensidade e duração da precipitação (VAREJÃO-SILVA, 2006). O pluviógrafo é mais completo que os pluviômetros, apresentando um custo maior e também uma complexidade operacional superior (TUCCI, 2004). A unidade de medição habitual destes aparelhos é o

milímetro de chuva, que corresponde à queda de um litro de água por metro quadrado da projeção da superfície terrestre (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Ainda que a coleta dos dados de precipitação por meio destes instrumentos seja razoavelmente confiável, existe a deficiência de estações meteorológicas em algumas regiões do Brasil, em razão da imensa extensão territorial do país e ainda pela presença de locais de difícil acesso (FREITAS, FRANCHITO e RAO, 2010). Além disso, embora os pluviômetros sejam bastante utilizados em todo o território nacional, existem alguns erros associados em suas medições, como por exemplo, devido ao baixo número de instrumentos e sua localização, a escassez de frequência de monitoramento, a compensação de valores quando os mesmos não são coletados, entre outros elementos que são capazes de afetar os resultados (ALMEIDA, 2017).

De acordo com Liebmann e Allured (2005), o problema mais difícil, associado às medições de precipitação, é a ocorrência de valores ausentes, falhas ou descontinuações nos dados obtidos de estações pluviométricas. Algumas vezes os valores ausentes são anotados como zero, e em outras, valores em branco são lançados nos dias com precipitação zero. Um outro contratempo é que os dados que são obtidos de instituições distintas não são padronizados, uma vez que essas instituições enviam os dados diariamente, e em muitas ocasiões de equipamentos distintos. Ademais, existem dados que são coletados manualmente em algumas estações, o que pode levar a erros na transcrição dos dados (VASQUES, 2007).

Segundo Naghettini (1997), alterações que possam ocorrer na localização de uma estação pluviométrica, ou a mudança do vento local provocada pelo crescimento de árvores ou pela construção de prédios próximos, entre outros fatores, podem introduzir os chamados erros sistemáticos em uma série pluviométrica. Além disso, falhas nas observações ou períodos sem informações podem eventualmente estar presentes nas séries pluviométricas obtidas para análise e estudo.

Existem técnicas para avaliar a consistência dos dados e para preenchimento das falhas, sendo as mais comuns: Média Aritmética, Ponderação Regional, Regressão Linear Múltipla e a Ponderação Regional com Base em Regressões Lineares, conforme estudo realizado por Silva e Jardim (2017), que analisaram essas quatro técnicas afim de comparar e definir a melhor para correção de falhas de precipitação na região noroeste do Estado de Minas Gerais. Segundo os autores, a técnica de Regressão Linear Múltipla foi a que resultou em melhores estimativas nas escalas anual e mensal no intervalo dos meses chuvosos de outubro a maio; entretanto, no

período seco, de junho a setembro, não se verificou uma técnica melhor em relação às outras. Neste trabalho, será utilizada a técnica da regressão linear múltipla, a qual será descrita na seção de Metodologia.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) é responsável pela coordenação da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), no qual possuem quase 23 mil estações sob cuidados de diferentes instituições. A ANA administra cerca de 4.841 pontos de monitoramento no país (dados de 2020), distribuídos em estações que abrangem dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos (ANA, 2021).

Essas informações, que estão disponíveis no Portal Hidroweb, são obtidas por meio da coleta automática ou convencional de dados hidrometeorológicos. No caso da coleta convencional, são realizados registros diários pelos observadores e as medições são executadas pelos técnicos em campo nas estações hidrometeorológicas parceiras ou contratadas pela ANA, tais como o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE/SP), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM/MG), o Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANÁ) e as empresas contratadas: COHIDRO, empresa Construfam Engenharia e Empreendimentos (CONSTRUFAM), a Universidade Federal do Ceará (UFC), e outras mantidas pelos Estados por meio de programas e parcerias (ANA, 2020).

Diante dessas adversidades relacionadas aos dados pluviométricos, surge a necessidade de acrescentar outras formas de obtenção destes dados, como por exemplo, dados de precipitações estimadas por meio de satélites meteorológicos. Estas estimativas de precipitação serão detalhadas nas próximas subseções deste Referencial Teórico.

#### **4.4 Estimativas de precipitação por satélites**

As limitações existentes nas medições de dados das redes hidrometeorológicas estimularam a procura por outras técnicas para preencher as lacunas deixadas, especialmente, pela baixa cobertura espacial dos instrumentos. O sensoriamento remoto é uma dessas técnicas que permite a obtenção remota de dados com ampla cobertura espacial.

Segundo Meneses e Almeida (2012), o sensoriamento remoto pode ser definido como uma ciência tecnológica com instrumentos capazes de alcançar e obter dados por meio da detecção

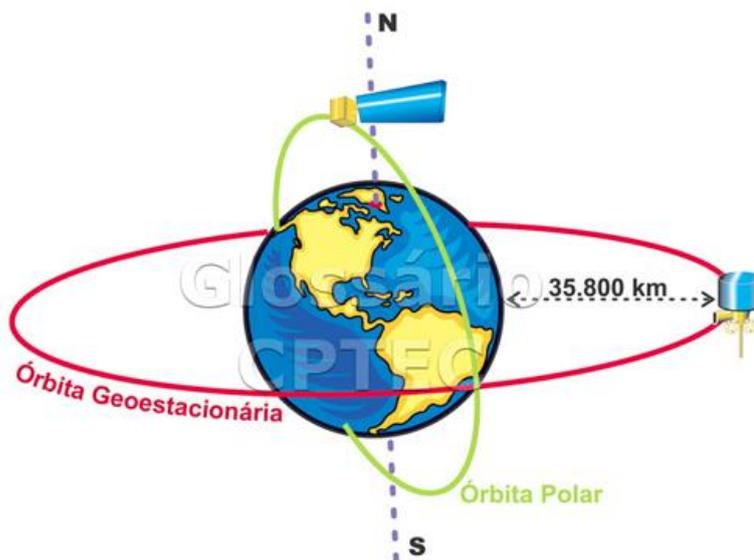
e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres à distância, sem que se tenha contato físico entre o sensor e o objeto. Assim, por meio de aparelhos chamados de sensores remotos, levados a bordo de aeronaves ou de satélites, uma imagem é produzida, e esta é denominada de fotografia aérea ou imagem de satélite.

O uso dos sensores orbitais estão cada vez mais frequentes, visto que disponibilizam informações rápidas com qualidade e cobertura espacial para utilização em diversos tipos de estudos hidrológicos, sobretudo abrangendo análise de cobertura vegetal e uso do solo, caracterização de bacias hidrográficas, inundações, temperatura da superfície, umidade do solo e precipitação (WAGNER *et al.*, 2012).

Os dados de precipitação precisam ser precisos, pois são fundamentais para avaliar o risco de eventos naturais relacionados a eventos extremos. Sendo assim, as análises baseadas em medições de satélites são bastante importantes, pois completam as lacunas observacionais e asseguram a continuidade da obtenção de dados espaciais e temporais, até mesmo nos dias em que os dados de precipitação intensa não possam ser coletados com precisão (Hénin *et al.*, 2018).

Os satélites meteorológicos podem possuir a órbita polar ou geoestacionária (Figura 2), sendo que na órbita polar o satélite gira circularmente em torno do globo terrestre no sentido norte e sul a uma baixa altitude, se favorecendo da rotação da Terra para abranger diferentes regiões. Já na órbita geoestacionária o satélite se localiza sobre o equador, permanecendo estacionário em relação a Terra e atingindo altitudes mais altas, efetuando várias observações por dia ou hora em relação a mesma área do globo (Figura 2). A maioria dos satélites meteorológicos são do tipo polar, porque permite uma maior cobertura e abrangência do globo terrestre, gerando menos custos (FENSTERSFER, 2013).

Figura 2: Representação dos tipos de órbitas dos satélites meteorológicos.



Fonte: INPE/CPTEC (2020).

Os sensores dos satélites podem ser classificados como passivos ou ativos, de acordo com a fonte de radiação eletromagnética. No caso do sensor passivo, é utilizada a energia decorrente de uma fonte natural, enquanto que no ativo ocorre uma emissão de energia, na qual é medida a intensidade da parcela refletida sobre a sua superfície. O nível de detalhes de uma imagem obtida por sensoriamento remoto está relacionado à sua resolução espacial ou amostragem espacial, sendo que os satélites possuem resoluções diferentes, de acordo com sua funcionalidade e objetivo (ALMEIDA, 2017; MÉLLO, 2019).

De acordo com Méllo (2019), a resolução espacial estabelece a área mínima que o sensor consegue imagear, enquanto que a resolução temporal está associada com a frequência que o sensor captura um certo ponto; sendo que tanto a resolução temporal, quanto a espacial, dependem da altura e do ângulo em que o sensor se encontra. Ainda segundo o mesmo autor, existe também a resolução radiométrica, que remete à quantidade de níveis de cinza que o sensor é apto a detectar, sendo indicada em números de dígitos binários (bits), visto que quanto maior for essa resolução, maior será a nitidez da imagem.

Petty (1995) destaca que a estimativa da precipitação por satélite é baseada na medição da radiação eletromagnética, refletida ou emitida, pelas nuvens e pela chuva. Posto isso, diferentes materiais possuem reflectâncias diferenciadas; desta forma, o brilho da luz do sol refletido pelas nuvens pode sugerir a sua espessura e permite estimar o volume de água no interior da mesma.

De acordo com Levizzani (1998), as formas iniciais de estimar a precipitação por meio de satélites baseavam-se em faixas de comprimento de onda, associadas ao infravermelho e visível, o que significa uma medição indireta, condicionada ao evento de chuva. Posteriormente foram surgindo métodos que empregavam imagens de sensores de micro-ondas, que permitem o conhecimento da presença de água e/ou cristais de gelo no interior da nuvem, e não somente na superfície.

Com o desenvolvimento de novos dispositivos e métodos, vários produtos provenientes de sensoriamento remoto estão disponíveis atualmente, permitindo a obtenção das estimativas de precipitação, como por exemplo: o *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN), a técnica *MORPHing* (CMORPH); o *TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis* (TMPA), o *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMaP) e o *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP) (QUEDI; CAMPOS e FAN, 2018).

A ANA possui uma rede de monitoramento hidrológico por satélite em parceria com o *Institut de Recherche pour le Développement* – IRD (órgão de pesquisa francês) tendo sido criado um portal chamado HidroSat, englobando diversas estações virtuais. Essas estações possibilitam a obtenção de séries temporais com mais de 10 anos de dados provenientes de sensores a bordo de satélites, permitindo expandir o monitoramento hidrológico com credibilidade e também alcançar dados com uma maior frequência de determinados parâmetros como a cota, turbidez, concentração de material em suspensão e de clorofila-a (ANA, 2021).

Ramos *et al.* (2021), destacam que uma das maiores dificuldades do Programa Mundial de Pesquisa do Clima é analisar se as observações e dados disponíveis são capazes de assegurar a avaliação dos extremos do tempo e do clima. Sendo assim, foi avaliado no estudo, as incertezas em diferentes produtos de precipitação no caso de dois eventos fluviais atmosféricos (nuvens extensas com alto teor de vapor d'água), um na Califórnia (Estados Unidos) e outro em Portugal. Os resultados mostraram que os produtos de precipitação baseados em dados de satélite, individualmente ou combinados com outros produtos, têm um desempenho pior na captura de totais diários de precipitação, no qual existe uma subestimação geral da precipitação pelos diferentes produtos.

Neste trabalho serão utilizados os dados de satélites do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*)/TMPA, do CMORPH e do *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM* (IMERG),

por serem mais utilizados em estudos relacionados a eventos extremos de precipitação, e por serem gratuitos e de fácil acesso. Estes produtos serão descritos a seguir.

#### 4.4.1 *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*

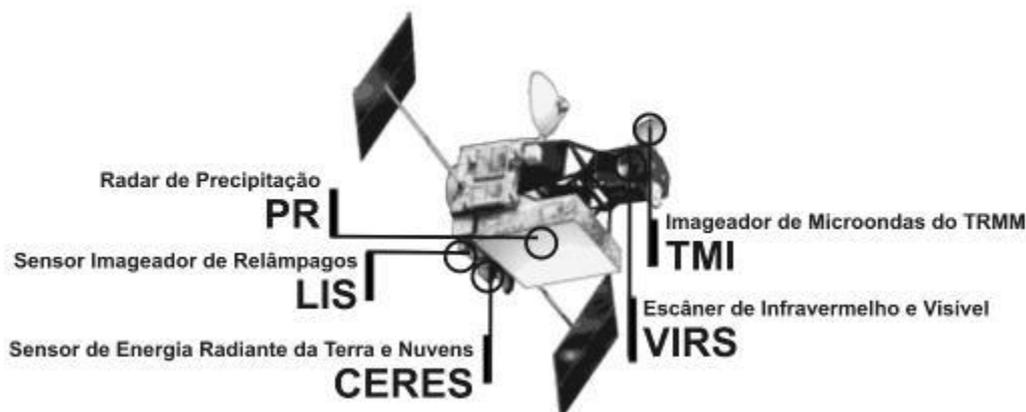
O satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* foi um projeto da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* em parceria com a *Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)*, e foi lançado em 27 de novembro de 1997 para melhorar o entendimento da distribuição e variabilidade da precipitação tropical e subtropical, e verificar sua influência no clima global. Ele operou até 15 de julho de 2015 fornecendo informações imprescindíveis sobre as chuvas e a liberação de calor que promove a circulação atmosférica global, a qual dirige as variações no tempo e clima. Entretanto, atualmente, o *Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA)*, que é um produto do TRMM, continua a fornecer dados de precipitação, a partir da combinação de vários satélites com postos pluviométricos em superfície.

A medição da precipitação tropical por meio do satélite TRMM foi integrada a missão GPM (*Global Precipitation Measurement*), uma rede internacional de satélites que fornece observações globais da geração de chuva e neve. O TRMM disponibiliza produtos distintos de precipitação, os quais são bastante utilizados para o monitoramento, modelagem e pesquisa, sendo o seu objetivo principal avançar, além das latitudes tropicais, na qualidade das estimativas dos satélites (Hénin *et al.*, 2018).

O satélite TRMM possui órbita circular, não sincronizada com o Sol, com 403 km de altitude (após 2001), inclinação de 35 graus em relação ao Equador, um período de precessão de cerca de 46 dias para os nós da órbita em relação ao Sol (afetando a hora do dia de amostragem em diferentes latitudes) (NASA, 2020). Os dados do TRMM são estimados a cada 3 horas, com cobertura geográfica entre as latitudes de 50°S e 50°N e resolução espacial de 0,25° (produtos 3B42 e 3B43) (NASA, 2020).

Os instrumentos utilizados para estimar a precipitação a bordo do satélite TRMM são: radiômetro na faixa do visível e no infravermelho (VIRS); imageador de microondas (TMI); radar de precipitação (PR), além de um sensor de energia radiante (CERES) e um sensor de imageamento de descargas elétricas em nuvens (LIS) (LOUZADA, 2016), conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Satélite TRMM e seus instrumentos.



Fonte: Almeida (2017).

Segundo Passow (2010), o primeiro instrumento espacial projetado para gerar mapas tridimensionais da estrutura de uma tempestade foi o radar de precipitação (PR); já o imageador de microondas (TMI) é um sensor de microondas passivo que possibilita a geração de dados quantitativos de precipitação sobre uma ampla área abaixo do satélite, permitindo quantificar o vapor de água, a água presente nas nuvens e a intensidade da precipitação na atmosfera. Segundo o mesmo autor, a indicação de chuvas também é fornecida pelo scanner de radiação visível e infravermelha (VIRS), interligando as observações levantadas pelo TRMM junto com as informações coletadas pela missão GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), entre outras. Já o sistema de nuvens e energia radiante (CERES) controla a energia trocada entre o Sol, a atmosfera terrestre, a superfície e as nuvens, e o espaço; e por fim, o sensor de imageamento de raios (LIS) é um instrumento muito avançado para o monitoramento de raios na região tropical do globo (PASSOW, 2010).

Para aprimorar os resultados, melhorar a cobertura e a resolução, os pesquisadores têm conciliado esses sensores do TRMM com outros satélites e dados de superfície, por meio de diversos algoritmos. Por mais que seja possível estimar a precipitação unicamente a partir de um tipo de sensor, essa combinação possibilita alcançar os mais variados produtos, tais como: TRMM-2B31 (TMI + TRMM PR), TRMM-3B42 (TRMM e outros conjuntos de dados de precipitação), e TRMM-3B43 (TRMM-3B43 e outras fontes de dados de precipitação). Sendo assim, o usuário pode obter os produtos resultantes destas diferentes combinações (ALMEIDA, 2017).

Bernardi (2016) avaliou a qualidade das estimativas do TRMM no estado do Rio Grande do Sul e concluiu que as estimativas do produto 3B42 apresentaram bons resultados em séries de

15 e 30 dias e os piores desempenhos foram nas regiões litorâneas do estado, o que pode ser decorrente da maritimidade dessas regiões. O autor avaliou que este produto, por mais que apresente erros por se tratar de medidas indiretas, pode ter um grande potencial como alternativa de dados pluviométricos. Collischonn *et al* (2017) destacou em sua pesquisa que os dados de TRMM conseguiram reportar fielmente o regime de chuvas da bacia do Alto Paraguai e as variações sazonais da chuva foram reproduzidas satisfatoriamente. A precipitação, em certos eventos, foi sub ou superestimada de forma pontual, porém quando houve uma ponderação sobre a bacia, os dados demonstraram resultados muito similares com os alcançados por interpolação de pluviômetros. As estimativas de precipitação por satélite possuem uma grande vantagem que é o número irrisório de falhas nas séries temporais.

#### *4.4.2 Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)*

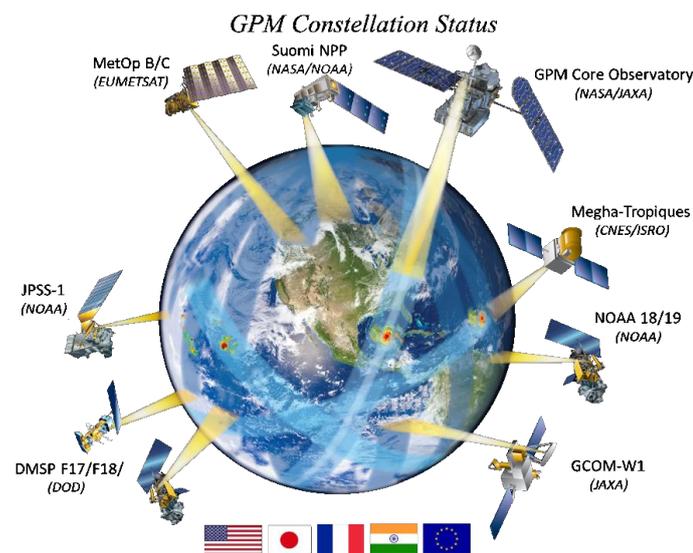
O *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM* (IMERG) é sucessor do TRMM e é um algoritmo utilizado para estimar a precipitação na maior parte da superfície da Terra a partir de informações da constelação de satélites GPM (Figura 4). Ele dispõe de uma resolução temporal de 30 minutos e espacial de 0,1° de latitude por longitude (

Figura 5). O IMERG é um algoritmo de grande importância, pois grande parte da superfície da Terra é carente de instrumentos de medição de precipitação em superfície (NASA, 2020).

As estimativas de precipitação da constelação de satélites GPM são calculadas por meio dos instrumentos de micro-ondas, radar de precipitação de dupla frequência (*Dual Frequency Precipitation Radar - DPR*), e imageador de micro-ondas do GPM (*GPM Microwave Imager - GMI*).

Os dados de precipitação do IMERG representam uma combinação das estimativas de precipitação de todos os sensores de micro-ondas da constelação de satélites com mais frequentes, embora menos precisas, observações baseadas em sensores infravermelho a partir de satélites geoestacionários e dados mensais de precipitação em superfície de estações meteorológicas. Há ainda uma calibração entre os satélites da constelação GPM, o que significa que as estimativas de precipitação de um satélite podem ser corrigidas a partir dos dados de outro, aumentando a precisão e consistência das estimativas produzidas por instrumentos individuais (HOU *et al.*, 2014).

Figura 4: Ilustração da constelação de satélites GPM.

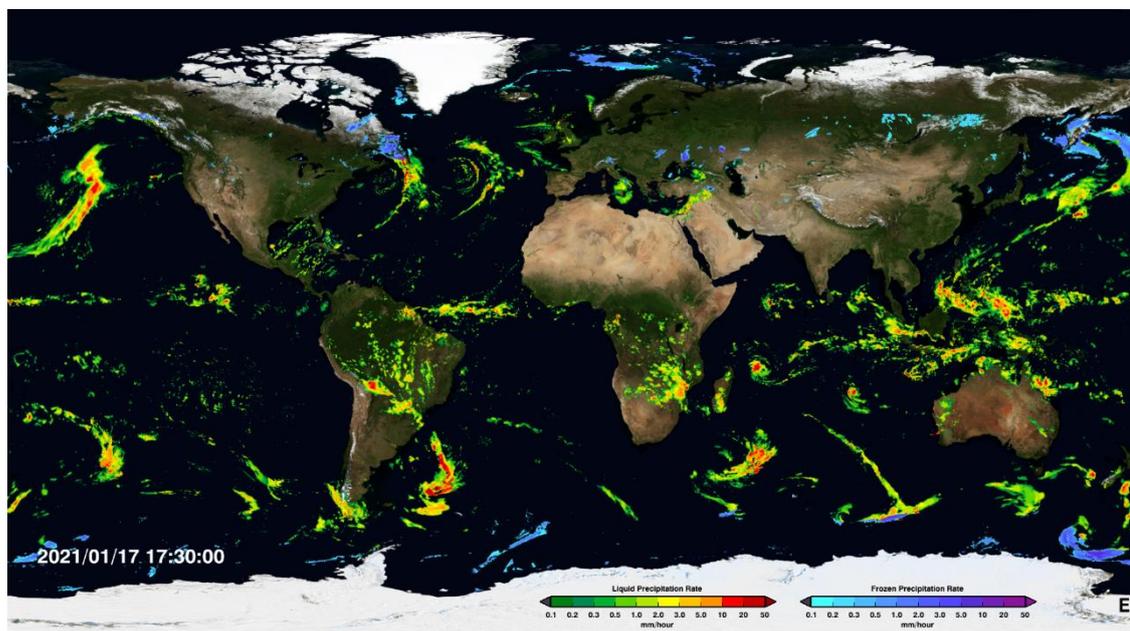


Fonte: NASA (2020).

O produto inicial do IMERG é disponibilizado somente 4 horas após a captura dos dados pelos satélites, o que é chamado de *Early Run* (rodada inicial) e almeja contribuir na previsão de enchentes e outras informações para previsão de risco por parte daqueles que necessitem de

informações em tempo real. Decorridas mais 14 horas, a *Late Run* (rodada posterior) é disponibilizada com a mesma função da primeira, porém com mais tratamentos aplicados (GADELHA, 2018; HUFFMAN *et al.*, 2020). Finalmente, depois de 3 meses e meio, a *Final Run* (rodada final) é disponibilizada, sendo que, neste caso, o produto é ajustado a partir de dados de estação em superfície e, portanto, esta rodada é mais adequada para fins de pesquisa (HUFFMAN *et al.*, 2020).

Figura 5: Imagem da estimativa de precipitação global do dia 17/01/2021 às 17:30hs por meio dos dados do IMERG.



Fonte: NASA (2020).

Para conseguir entender melhor a distribuição da precipitação e a ocorrência de eventos extremos em todo o mundo, é necessário um registro de dados mais longo, pois com essas informações, os modelos climáticos e meteorológicos e as análises estatísticas podem ser mais precisas, comparando e contrastando dados passados e presentes. As estimativas adquiridas por meio de produtos de sensoriamento remoto, tais como o IMERG, tornam-se alternativas importantes para a área científica e econômica, visto que em regiões com grandes bacias hidrográficas, como no caso do Brasil, o monitoramento *in situ* é escasso (BERNARDI, 2016).

Existem alguns estudos como Bueno e Bourscheidt (2019) que mostram que na área de captação do Sistema Cantareira (São Paulo), o produto do IMERG apresentou uma correlação válida com os dados obtidos na superfície tendo em conta um intervalo temporal mensal, e do ponto de vista espacial, a distribuição da pluviometria também apresentou similaridade com os dados de superfície e de satélites. Gadelha (2018) utilizou os dados do IMERG para avaliar a estimativa em todo o território brasileiro e em algumas subáreas do país comparando com dados dos pluviômetros no ano de 2016. Segundo o autor, de modo geral, o IMERG apresentou uma boa estimativa de precipitação, e mostrou-se que se assemelha consideravelmente de dados de campo quando comparados em escala mensal, apesar de apresentar algumas falhas significativas em escala diária.

#### 4.4.3 CPC Morphing Technique (CMORPH)

O CMORPH (CPC MORPHing) é uma técnica que combina algoritmos para estimar a precipitação pluviométrica a partir de sensores de micro-ondas passivos a bordo de satélites em órbita polar. Contudo, como a resolução espacial e temporal dos satélites em órbita polar ainda não são capazes de representar adequadamente a faixa de domínio do CMORPH, são realizadas propagações no tempo e espaço, por meio de sensores infravermelho a bordo dos satélites em órbita geoestacionária (JOYCE *et al.*, 2004).

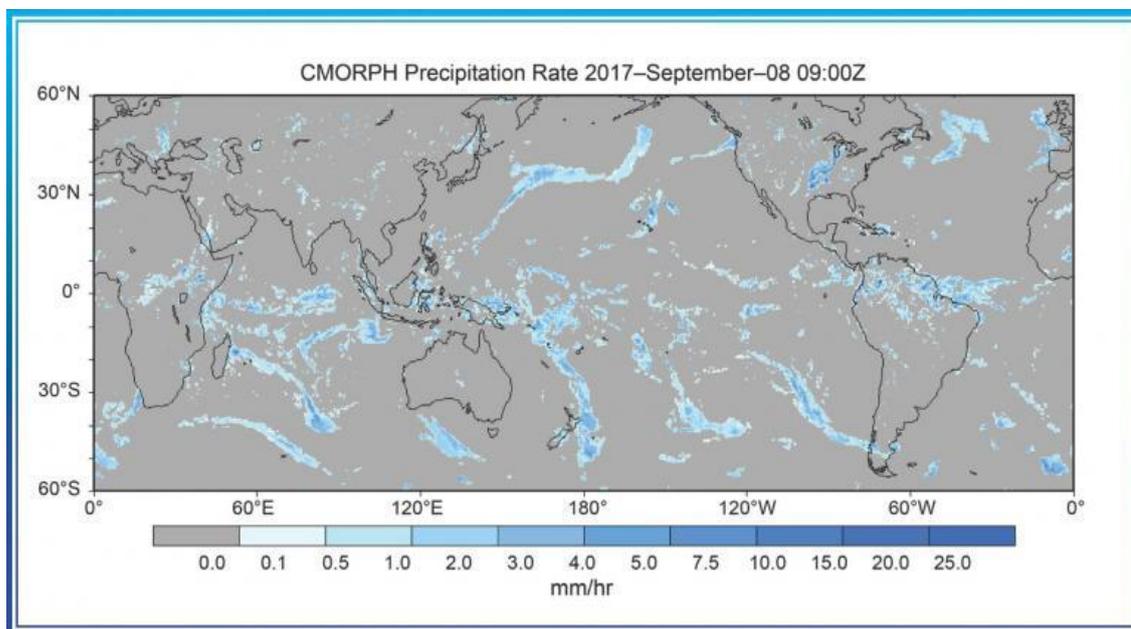
A técnica do CMORPH utiliza os dados na banda do infravermelho somente para criar um campo de agitação das nuvens, e em seguida, este é usado para propagar os campos de precipitação e aferir por interpolação os dados entre os intervalos de observações. Essas imagens no infravermelho conseguem mostrar os grupos de nuvens e deslocamentos que são empregados para gerar a propagação das imagens de micro-ondas. Esse método, que utiliza o CMORPH para captar os sistemas de nuvens com base em órbitas de satélites geoestacionários, é chamado de CSAV (*Cloud System Advection Vector*) (FENSTERSFER, 2013).

Segundo Joyce *et al.* (2004), a resolução temporal da técnica CMORPH é de 30 minutos e sua resolução espacial é de 8 km no Equador ( $0,07277^\circ$  de latitude x  $0,07277^\circ$  de longitude), alcançada via interpolação, resultante da necessidade de representar a propagação dos sistemas de chuvas em incrementos de meia hora (

Figura 6).

Os dados coletados do CMORPH pelos pesquisadores constituem o chamado Registro de Dados Climáticos (CDR) das análises de precipitação global com alta resolução. Essas estimativas de precipitação são reprocessadas e corrigidas por tendência. Esse sistema de processamento CMORPH-CDR corrigido por tendência fornece estimativas de precipitação de satélite interligadas com correção de tendência no âmbito global. A geração dos campos de saída de precipitação é um conjunto de três diferentes resoluções de espaço-tempo para que possa adaptar-se aos diferentes requisitos dos usuários (NOAA, 2021).

Figura 6: Imagem da estimativa de precipitação global para o dia 08/09/2017 às 09:00 hs por meio dos dados do CMORPH.



Fonte: NOAA (2021).

Sodré e Rodrigues (2013), utilizaram a técnica CMORPH para comparar com a estimativa de precipitação das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em diferentes regiões do Brasil e constataram que as informações do CMORPH possuem uma boa precisão, salvo na região Nordeste do Brasil. Fensterseifer (2013) também utilizou essa técnica para avaliar a qualidade das estimativas de precipitação derivadas de satélites na Bacia do Alto Jacuí (Rio Grande do Sul), no qual o produto do CMORPH se mostrou bastante eficiente, isto porque emprega o maior número de fonte de informações ou as explora de forma mais hábil.

Com os dados pluviométricos obtidos a partir das estações e dos produtos de satélites pode ser realizada uma análise de modo a comparar essas fontes entre si e verificar o potencial de utilização dos produtos de satélites como uma opção de base de dados para estudos de eventos hidrológicos extremos. A área de estudo e o procedimento de como esta análise comparativa foi realizada são descritos a seguir.

## 5 ÁREA DE ESTUDO

Uma bacia hidrográfica pode ser considerada uma área geográfica, normalmente formada por um curso d'água principal que recebe água de seus afluentes, podendo integrar sub-bacias. Pode ser também definida como uma área com limites determinados, composta pelos recursos hídricos, solo, vegetação, meio construído (antrópico), e por diversos elementos ambientais (MOTA, 2016).

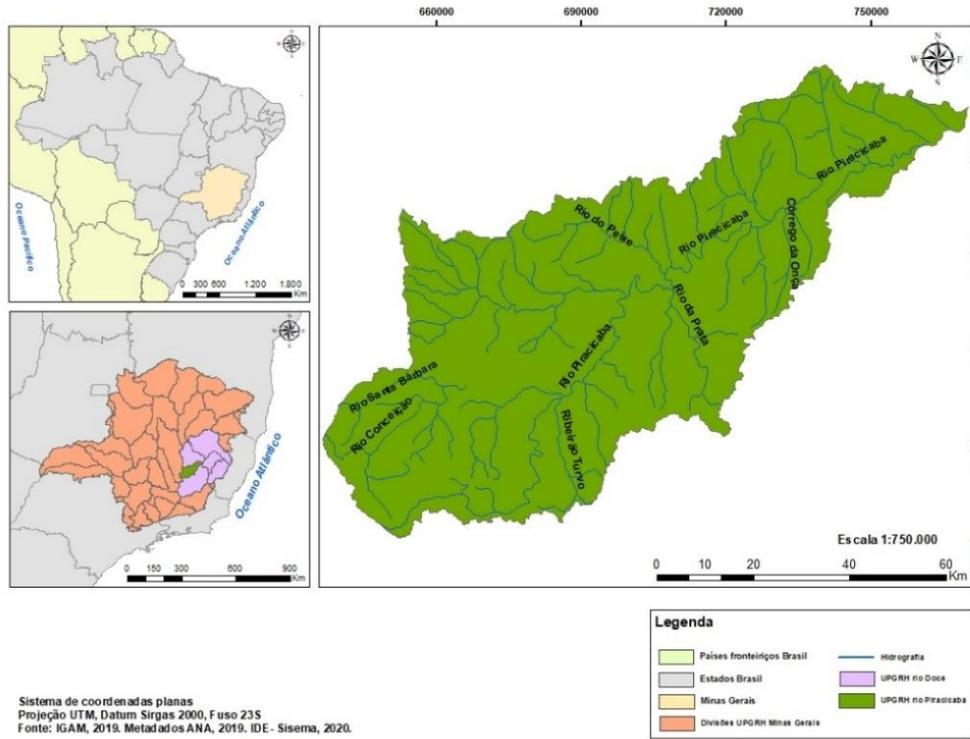
Com uma área de drenagem de 86.715 quilômetros quadrados, a bacia hidrográfica do rio Doce abrange dois Estados: Minas Gerais e Espírito Santo. Em Minas, ela é subdividida em seis Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs), às quais correspondem as sub-bacias: rio Piranga, rio Piracicaba, rio Santo Antônio, rio Suaçuí, rio Caratinga e rio Manhuaçu (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE, 2019).

A sub-bacia do rio Piracicaba (Figura 7 e Figura 8) possui uma área de aproximadamente 5.465,38 quilômetros quadrados, correspondendo a 7,98 % do território da bacia do rio Doce, e o seu curso d'água principal apresenta 241 quilômetros de extensão. O rio Piracicaba é o curso d'água mais importante da região e suas nascentes encontram-se no município de Ouro Preto, a 1.680m de altitude, passando por cidades como Rio Piracicaba, Nova Era, Antônio Dias e pela Região do Vale do Aço, formada por Coronel Fabriciano e Ipatinga, na margem esquerda e Timóteo, na margem direita. Os principais rios afluentes da bacia são os rios do Peixe, Turvo, Conceição, Una, Machado, Santa Bárbara e Prata. A bacia também recebe a descarga de muitos córregos e ribeirões, que constituem sua rede de drenagem (PARH PIRACICABA, 2010).

Os 21 municípios que compreendem a bacia são: Alvinópolis, Antônio Dias, Barão de Cocais, Bela Vista de Minas, Bom Jesus do Amparo, Catas Altas, Coronel Fabriciano, Ipatinga, Itabira, Jaguaráçu, João Monlevade, Mariana, Marliéria, Nova Era, Ouro Preto, Rio Piracicaba, Santa Bárbara, Santana do Paraíso, São Domingos do Prata, São Gonçalo do Rio Abaixo e Timóteo (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRACICABA, 2019).

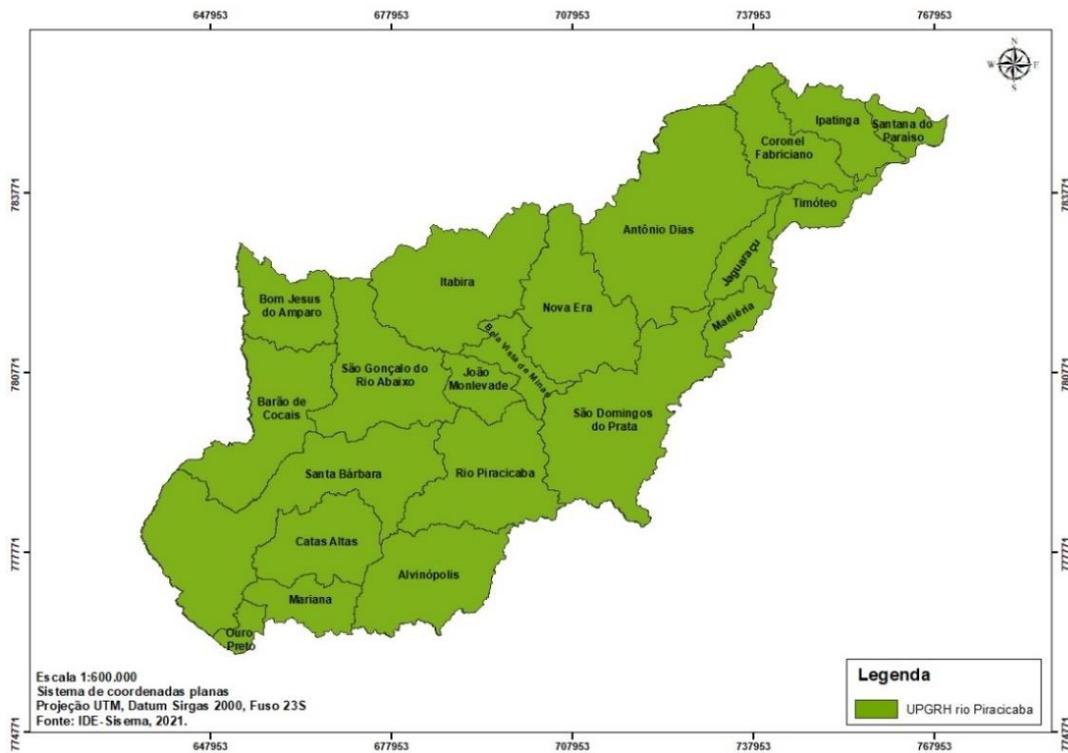
A população desses municípios é predominantemente urbana, correspondendo a cerca de 800 mil habitantes. A região é conhecida por possuir áreas de minerações, lavras de materiais preciosos, sendo uma das maiores reservas do mundo em minério de ferro, manganês, bauxita, ouro, esmeralda, alumínio, quartzito entre outros; apresentando quatro grandes siderúrgicas em áreas urbanas e amplas áreas de reflorestamento (PIRH, 2010).

Figura 7: Localização da UPGRH do rio Piracicaba/MG.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 8: Municípios que compõem a UPGRH do rio Piracicaba/MG.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

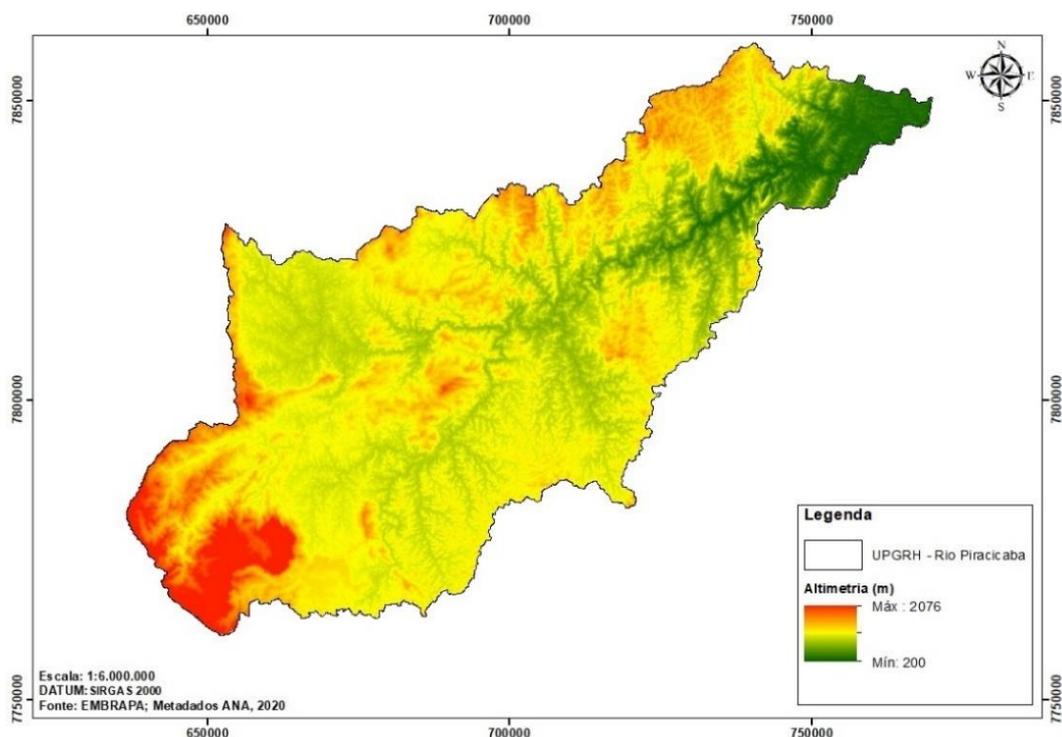
O Estado de Minas Gerais, onde está localizada a bacia hidrográfica do rio Piracicaba, apresenta um relevo diferente de outras regiões do Brasil, pois possui uma diversidade geológica abundante, sucedendo nessa área sequências de idades arqueana a fanerozoica, em diversos contextos tectônicos e metamórficos (MACHADO e SILVA, 2010). Esta diversidade geológica se reflete na história mineradora do Estado, a qual está estreitamente ligada à exploração de recursos minerais desde o período colonial, bem como em sua geodiversidade (MACHADO e SILVA, 2010).

Segundo o Plano de Ação de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio Piracicaba (2010), na bacia prevalecem os solos das classes Latossolos, Argilossolos e Cambissolos, sendo que os Argilossolos são os de maior erodibilidade e os Latossolos, os de menor. Nessa região, existe muita riqueza em recursos minerais, encontrando-se uma das maiores reservas do mundo em minério de ferro, manganês, bauxita, ouro, esmeralda, alumínio, quartzito, entre outros (PARH PIRACICABA, 2010).

Segundo CUPOLILLO, ABREU e VIANELLO (2008), na bacia hidrográfica do rio Doce destacam-se três grandes compartimentos da evolução topográfica e que possibilitam o reconhecimento de unidades espaciais de clara delimitação. Segundo os autores, o primeiro compartimento é composto por um grupo de terrenos de altitudes moderadas ou paralelas ao nível do mar, abrangendo as propriedades da planície costeira e os tabuleiros que delimitam a transição da primeira para os chamados domínios colinosos (unidade de relevo predominante em relação as demais formas existentes, nesse caso que possuem muitas colinas). Além das altitudes baixas, este compartimento topográfico apresenta uma superfície de baixa a nula rugosidade, o que influencia no percurso das massas de ar que circundam por tal domínio (CUPOLILLO, ABREU e VIANELLO, 2008). O segundo compartimento, segundo os mesmos autores, pode ser visto como o mais vasto da bacia do rio Doce, se expandindo das proximidades de sua foz até a base das serras que delimitam a porção leste desta bacia. Este compartimento possui uma grande área denominada de mares de morros, com serras alojadas, das quais as altitudes crescem moderadamente em direção ao oeste com uma perceptível rugosidade, sendo que no panorama climatológico, os aspectos desse compartimento, além do contexto morfogenético que o qualifica, intervêm no comportamento das massas de ar. Finalmente, os mesmos autores descrevem o último compartimento, que é retratado por agrupamentos de serras de influência continental, os quais são fronteiras importantes que limitam a ação de certas massas de ar originadas no oceano Atlântico.

A UPGRH do rio Piracicaba possui uma alta tendência a erosão, sendo que mais de 50% da unidade demonstra classe de suscetibilidade a erosões fortes. Essa tendência decorre da associação ou não de estiagens prolongadas, às chuvas torrenciais, aos solos susceptíveis, e aos amplos depósitos superficiais friáveis (que se fragmentam facilmente) que acontecem em terraços e nas baixas vertentes. A unidade possui vales encaixados, vertentes ravinadas e também um relevo acidentado na parcela próxima das nascentes do rio Piracicaba e nas outras partes altas da bacia, com altitudes variando entre 200 a 2.076m (Figura 9) (PARH PIRACICABA, 2010).

Figura 9: Mapa Topográfico da UPGRH do rio Piracicaba/MG.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Ademais, a UPGRH abriga em sua maior parte o bioma da Mata Atlântica, o qual apresenta uma das maiores riquezas de biodiversidade do planeta, além de possuir uma parcela de sua área no bioma do Cerrado (PARH PIRACICABA, 2010).

## 6 METODOLOGIA

### 6.1 Dados pluviométricos observados

Os dados pluviométricos das estações hidrometeorológicas instaladas nas cidades das microbacias estudadas foram obtidos por meio da base de dados do Hidroweb da ANA e também do banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o período de 2000 a 2019.

O portal Hidroweb é uma plataforma do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), que apresenta um banco de dados que abrange todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional, reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos. É uma ferramenta importante para a sociedade e instituições públicas e privadas, pois os dados são fundamentais para a gestão dos recursos hídricos e diversos setores econômicos (SNIRH, 2020).

O INMET é um órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento e tem como objetivo fornecer informações meteorológicas por meio de monitoramento, análise e previsão de tempo e de clima (INMET, 2020). O BDMEP abriga dados diários em formato digital, disponibilizando séries históricas das várias estações meteorológicas convencionais e automáticas da rede do INMET, de acordo com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial.

Portanto, os dados pluviométricos brutos das estações foram selecionados de acordo com o período úmido do ano hidrológico, de outubro a abril dos anos de 2000 a 2019, pois nessa época é que ocorrem os maiores volumes de precipitação. Após a separação dos dados pluviométricos para o período úmido, foi realizada uma verificação preliminar para detectar dados ausentes e registros com valores improváveis. No caso das séries que apresentaram falhas, foi feito o preenchimento das mesmas utilizando a técnica da regressão linear (BERTONI e TUCCI, 2013). Esta técnica correlaciona os valores da estação que apresenta falhas com os valores correspondentes às observações das outras estações, sendo escolhida para o preenchimento das falhas a estação que apresentar maior valor de  $R^2$ . Para utilizar esta técnica o valor de  $R^2$  deve ser maior que 0,7 e o valor de R deve ser maior que 0,8.

Após o preenchimento das séries pluviométricas foi necessário realizar uma análise de consistência para detectar os erros sistemáticos e verificar o grau de homogeneidade dos dados

provenientes de uma determinada estação pluviométrica em relação as estações vizinhas. Para isso, foi utilizado o método de análise de dupla massa para as séries mensais e anuais (TUCCI, 1993).

O método de dupla massa consiste em construir, em um gráfico cartesiano, uma curva duplo acumulativa, relacionando os totais anuais (ou mensais) acumulados obtidos da estação que se deseja analisar a consistência (nas ordenadas) e as médias acumuladas dos totais anuais (ou mensais) de todas as estações da região (nas abscissas). A região é hipoteticamente considerada homogênea do ponto de vista hidrológico, se os valores da estação que se deseja analisar a consistência são proporcionais aos observados na base de comparação, e os pontos devem se alinhar segundo uma única reta, cuja declividade é o fator de proporcionalidade entre ambas as séries (TUCCI, 1993).

## **6.2 Dados dos satélites**

Os dados horários de precipitação dos satélites TRMM e do IMERG foram obtidos por meio da plataforma *online* desenvolvida pela NASA GES DISC, denominada *Giovanni*, a qual permite visualizar e analisar parâmetros geofísicos de fácil acesso. Nessa plataforma é possível selecionar o tipo de produto desejado, bem como sua resolução temporal e espacial, de acordo com a disponibilidade.

Neste trabalho foi utilizado o produto 3B42-V7 do TRMM, que possui resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  e temporal de 3 em 3 horas para o período de 2000 a 2019. Para a análise dos dados do IMERG foi utilizada a Versão 06, *Final Run* (rodada final) com resolução temporal de 30 em 30 minutos e espacial de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  para o mesmo período.

Os dados horários de precipitação do CMORPH foram obtidos por meio da plataforma NCEI (*National Centers for Environmental Information*) CNOAA. O acesso é por meio do site no qual foram baixados os dados horários do CMORPH com resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  para o mesmo período.

## **6.3 Dados dos eventos extremos**

Os eventos extremos utilizados para esta pesquisa foram obtidos pelo Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD) do Governo Federal. Esse sistema reúne vários produtos da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC), no intuito de qualificar e dar

transparência à gestão de riscos e desastres no Brasil, mediante a viabilização de informações e dados sistematizados. Neste sistema é possível registrar os desastres ocorridos por município e Estado; realizar consultas e acompanhamentos sobre os processos de reconhecimento federal de situação de emergência ou de estado de calamidade pública, consultas sobre os processos da cessão de recursos para as ações de resposta aos desastres, entre outros (S2iD, 2021).

Os dados disponibilizados pelo S2iD podem ser filtrados por data, tipo de documento, Estado e município, e o tipo de desastre. Para esta pesquisa foram selecionados os dados referentes as cidades que abrangem a bacia do rio Piracicaba/MG e os desastres relacionados a eventos extremos de seca e de precipitação.

#### **6.4 Organização e Análise dos dados**

Primeiramente foram obtidos os dados dos eventos extremos registrados no S2iD nas cidades da bacia para o período de 2000 a 2019. Posteriormente, foram obtidos os dados das estações pluviométricas para o mesmo período e foi realizada a separação dos dados para o período úmido do ano hidrológico (outubro a abril de 2000 a 2019). Após isso, foi feito o preenchimento das falhas por meio do método de regressão linear, e a análise de consistência, por meio do método de dupla massa, conforme mencionado anteriormente. Os dados dos produtos de satélite foram selecionados para o mesmo período analisado.

Para que fosse possível realizar a análise estatística comparativa entre todas as fontes de dados, estas precisam apresentar uma mesma resolução espacial. As séries de precipitações coletadas pelas estações são pontuais, enquanto as estimativas dos satélites já são fornecidas em grades ou malhas considerando a chuva média em um determinado pixel. Os produtos TRMM e CMORPH, por exemplo, possuem uma grade de  $0,25^\circ$  de latitude x  $0,25^\circ$  de longitude, enquanto o IMERG possui uma resolução de  $0,1^\circ$  de latitude x  $0,1^\circ$  de longitude. De acordo com Bernardi (2016), nessa comparação, chamada de sub-pixels, os dados são interpolados para pixels menores e, para que estes dados possuíssem um mesmo espaçamento, foi utilizada a técnica de interpolação bilinear, que utiliza a média ponderada dos pixels originais que se encontram em volta do novo pixel. Assim, os dados pluviométricos do TRMM e do CMORPH foram interpolados para a grade de  $0,1^\circ$  de latitude x  $0,1^\circ$  de longitude pelo método bilinear no *software* QGIS 3.16 por meio da ferramenta “r.resamp.bspline”.

O QGIS é um software livre utilizado para criar, gerenciar, analisar e compartilhar dados espaciais por meio de análise espacial, imageamento e sensoriamento remoto, mapeamento e visualização, coleta e armazenamento de dados (DESCOMPLICA GIS, 2021).

Os dados horários dos produtos de satélite foram acumulados para se obter os valores diários. Isto foi feito porque a precipitação do TRMM 3B42-V7 registrada em um determinado dia corresponde a oito arquivos de 3 em 3 horas com um horário de início às 22h30 (UTC) do dia anterior até às 22h29 (UTC) daquele determinado dia. Portanto, o produto de precipitação diária do TRMM não corresponde às observações pluviométricas diárias fornecidas pelas estações do Hidroweb/ANA. No caso das estações do Hidroweb/ANA a precipitação é acumulada das 10:00 UTC do dia anterior às 10:00 UTC do dia atual. Estas diferenças poderiam ocasionar em erros ao serem comparadas as precipitações nos dias dos eventos extremos entre todas as fontes de dados. Por isso, optou-se por realizar os acumulados diários de precipitação considerando o mesmo horário dos dados do Hidroweb/ANA em todas as fontes de dados.

Assim, os dados de 30 em 30 minutos do IMERG foram convertidos para a escala de tempo local diária somando todos os 48 arquivos de 30 minutos das 10:00 às 10:00 UTC. Após isso, o acumulado diário de precipitação foi então multiplicado por um fator de 0,5 porque a unidade original de cada arquivo de 30 minutos corresponde a mm/h. No caso do TRMM, para minimizar a diferença com o horário de acumulação do Hidroweb/ANA, os arquivos de 3 em 3 horas foram acumulados das 12:00 UTC (10:30 UTC a 13:30 UTC) do dia anterior às 9:00 UTC (7:30 UTC a 10:30 UTC) do dia desejado, e então multiplicou-se por um fator de 3. Finalmente, no caso do CMORPH, os arquivos horários foram acumulados das 10:00 às 10:00 UTC e multiplicados por um fator de 24 para se obter a precipitação diária. Todos estes cálculos e manipulações dos arquivos foram realizados utilizando o *software Climate Data Operators – CDO*. O *software CDO* também foi utilizado para que os valores diários de precipitação dos satélites, obtidos como descrito anteriormente, fossem acumulados mensalmente e anualmente para a realização das análises comparativas.

Da mesma forma, no caso das estações pluviométricas, após proceder o tratamento dos dados, foram gerados os totais anuais e mensais para o período úmido de cada ano hidrológico, e os acumulados diários para as datas de ocorrência dos eventos extremos selecionados. Posteriormente, foram realizadas as análises estatísticas utilizando alguns indicadores (descritos a seguir) que permitiram validar as precipitações estimadas por meio dos produtos

de satélites meteorológicos selecionados, a partir dos registros das redes pluviométricas no período de estudo. Estes indicadores foram utilizados tanto na análise de todo o período de estudo (2000 a 2019), quanto para a análise dos eventos extremos selecionados.

O coeficiente de correlação de Pearson (Equação 1, de acordo com Teodoro et al., 2020), mede a intensidade da relação linear entre duas variáveis. Neste caso, pretendeu-se avaliar a relação entre os produtos de satélites (TRMM, IMERG e CMORPH) e os dados das estações pluviométricas, denominados de observados (OBS). Essa medida é adimensional e quanto mais próxima de 1 ou -1, maior é a correlação entre os dois conjuntos de dados.

$$CP = \frac{\sum_{n=1}^N (IMERG_n - \overline{IMERG})(OBS_n - \overline{OBS})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (IMERG_n - \overline{IMERG})^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (OBS_n - \overline{OBS})^2}} \text{ Equação 1}$$

Onde N representa o tamanho amostral, e o valor médio de cada conjunto é representado por um segmento de reta acima da sua denominação.

O BIAS ou Viés relativo (RMD) (Equação 2) compara as estimativas de chuva por satélite com as estimativas obtidas pelos pluviômetros, mostrando o quanto a precipitação estimada pelos satélites é superestimada ou subestimada (diferença) (ALMEIDA, 2017; TEODORO *et al.*, 2020).

$$RMD = \frac{\overline{IMERG} - \overline{OBS}}{\overline{OBS}} \times 100 \text{ Equação 2}$$

A Raiz do Erro Quadrático Médio (REMQ) é uma forma de quantificar o erro por meio do quadrado das diferenças entre as precipitações estimadas a partir dos produtos de satélite (Z) e as observadas com os pluviômetros (P) (Equação 3). Logo, quanto menor o REMQ, mais perto as estimativas de satélite estão das observações (ALMEIDA, 2017).

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P-Z)^2}{n}} \text{ Equação 3}$$

Depois de realizar a análise comparativa por meio dos indicadores estatísticos, foram confeccionados mapas pluviométricos da bacia por meio do *software* QGIS 3.16.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 Avaliação dos dados das estações pluviométricas

Foram identificadas no portal Hidroweb 117 estações localizadas nas cidades que abrangem a bacia do rio Piracicaba/MG. Dessas 117 estações, apenas 37 possuem dados de precipitação sendo que as outras possuem dados de clima e, dentre as 37 estações, somente 5 possuem dados pluviométricos consistentes (Tabela 1), ou seja, apresentam séries temporais representativas, longas, coerentes e estacionárias, podendo, efetivamente, serem utilizadas neste estudo. Também foram identificadas 5 estações meteorológicas externas à área de estudo (Tabela 2). Foram identificadas também mais 2 estações no banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP) do INMET, uma dentro da bacia e outra externa à bacia. Estas estações também foram utilizadas para a realização da interpolação dos dados pluviométricos, de modo a garantir uma melhor qualidade nesta interpolação. A Figura 10 apresenta a localização de todas as estações meteorológicas utilizadas neste estudo.

Tabela 1: Estações meteorológicas na bacia do rio Piracicaba/MG utilizadas neste estudo.

Cidade	Estação	Código	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Período
Coronel Fabriciano/Timóteo	Mário de Carvalho (MC) Rio	1942029	232	-19.5247	-42.6442	01/09/1986 a 01/09/2019 01/11/1940
Rio Piracicaba	Piracicaba (RP) Santa	1943001	623	-19.9228	-43.1778	a 01/10/2019 01/10/1941
Santa Bárbara	Bárbara (SB)	1943007	748	-19.9453	-43.4011	a 01/10/2019 01/01/1983
Catas Altas	Colégio Caraça (CC)	2043059	1300	-20.0969	-43.4881	a 01/10/2019 01/10/1946
São Gonçalo do Rio Abaixo	Usina Peti (UP)	1943027	1110	-19.8808	-43.3675	a 01/09/2019 01/01/2000
João Monlevade	João Monlevade (JM)	83591 (INMET)	860	-19.8238	-43.1441	a 31/05/2019

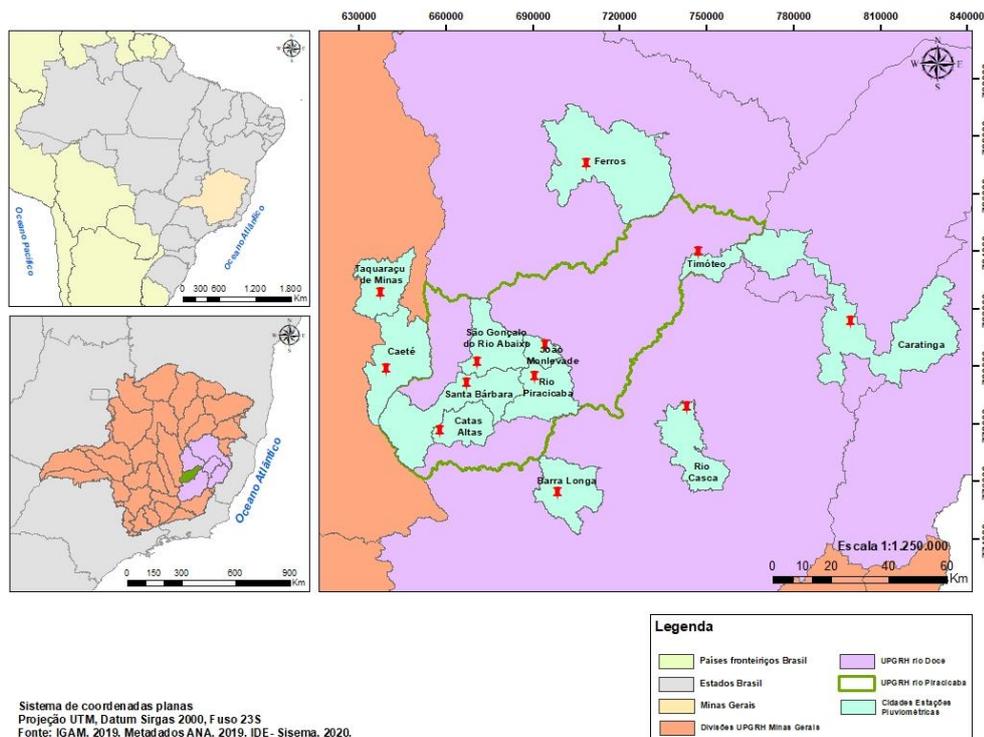
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Tabela 2: Estações meteorológicas externas à bacia do rio Piracicaba/MG utilizadas neste estudo.

Cidade	Estação	Código	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Período
Barra Longa	Fazenda Ocidente (FO)	2043027	462	-20.2856	- 43.0989	01/03/1967 a 01/12/2020
Caeté	Caeté (CA)	1943010	825	-19.9028	-43.6664	01/06/1941 a 01/12/2020
Caratinga	Caratinga (CT)	83592 (INMET)	610	-19.7358	-42.1372	01/01/2000 a 31/12/2019
Ferros	Ferros (FE)	1943003	470	-19.2503	-43.0144	01/03/1941 a 01/12/2020
Rio Casca	Fazenda Cachoeira D'Antas (FCD)	2042031	334	-20.0114	-42.6742	01/11/1981 a 01/12/2020
Taquaraçu de Minas	Taquaraçu (TA)	1943023	710	-19.6639	-43.6881	01/02/1942 a 01/12/2020

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

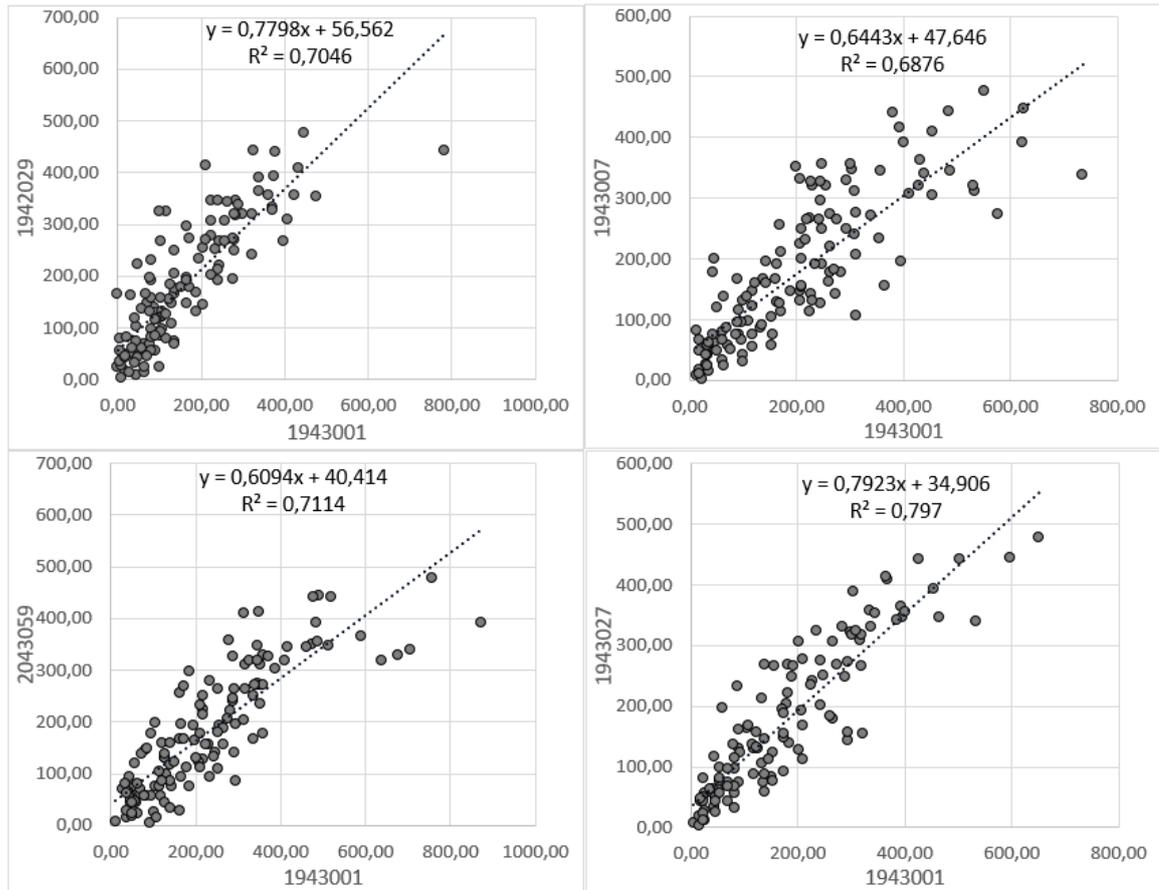
Figura 10: Mapa com a localização de todas as estações meteorológicas utilizadas neste estudo.



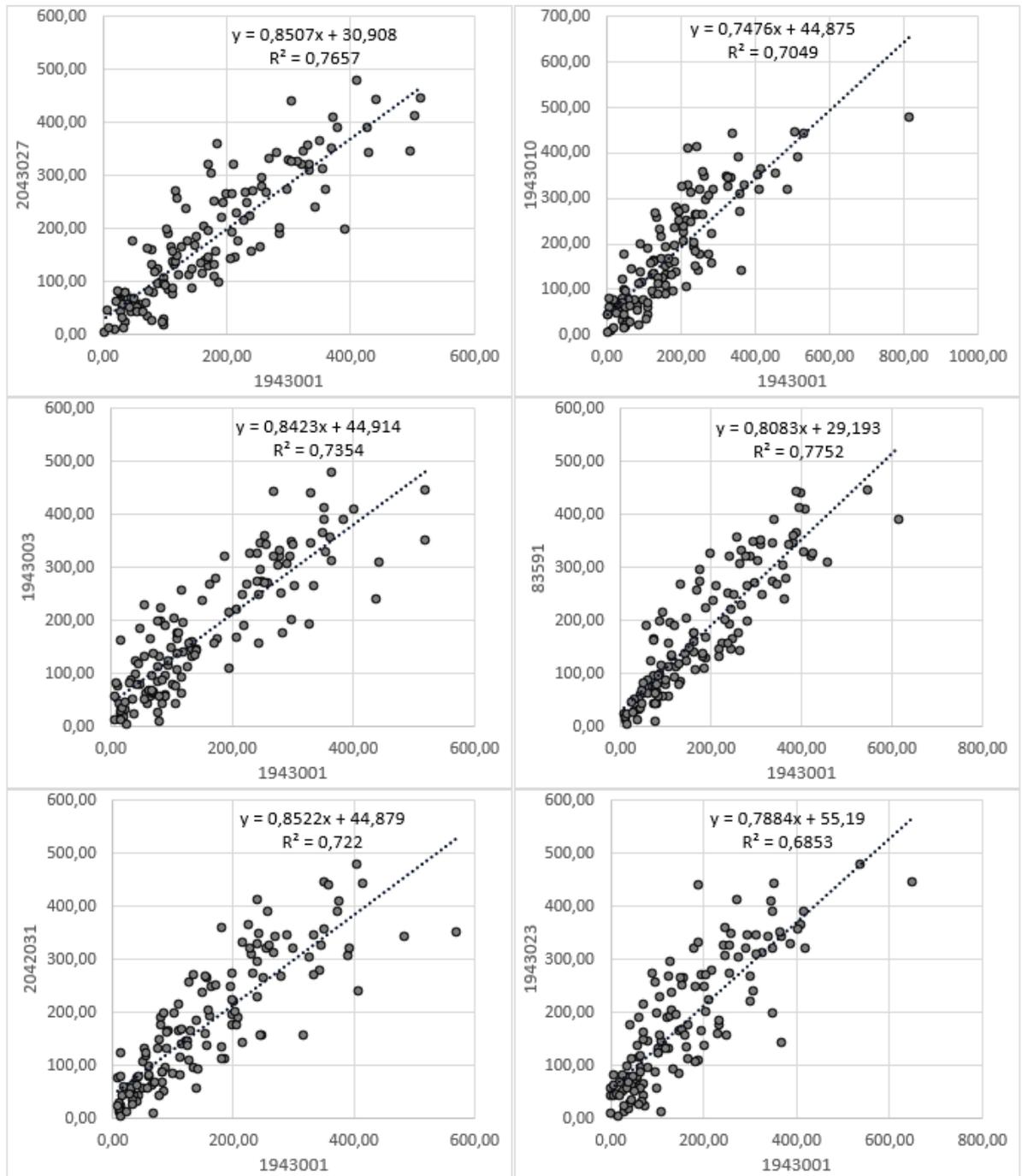
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Dentre as 12 estações selecionadas para o estudo, 10 apresentaram falhas ou dados ausentes. Os dados das duas que não apresentaram falhas [Estação 1943001 – rio Piracicaba (RP) e 83592 – Caratinga (CA)] foram utilizados para o preenchimento das falhas das outras estações, utilizando a regressão linear. Foi selecionada a equação de regressão cujo valor de  $R^2$  mais se aproximou de 1 para realizar o preenchimento (Figura 11).

Figura 11: Gráficos com a regressão linear das 10 estações preenchidas.



(Continua)



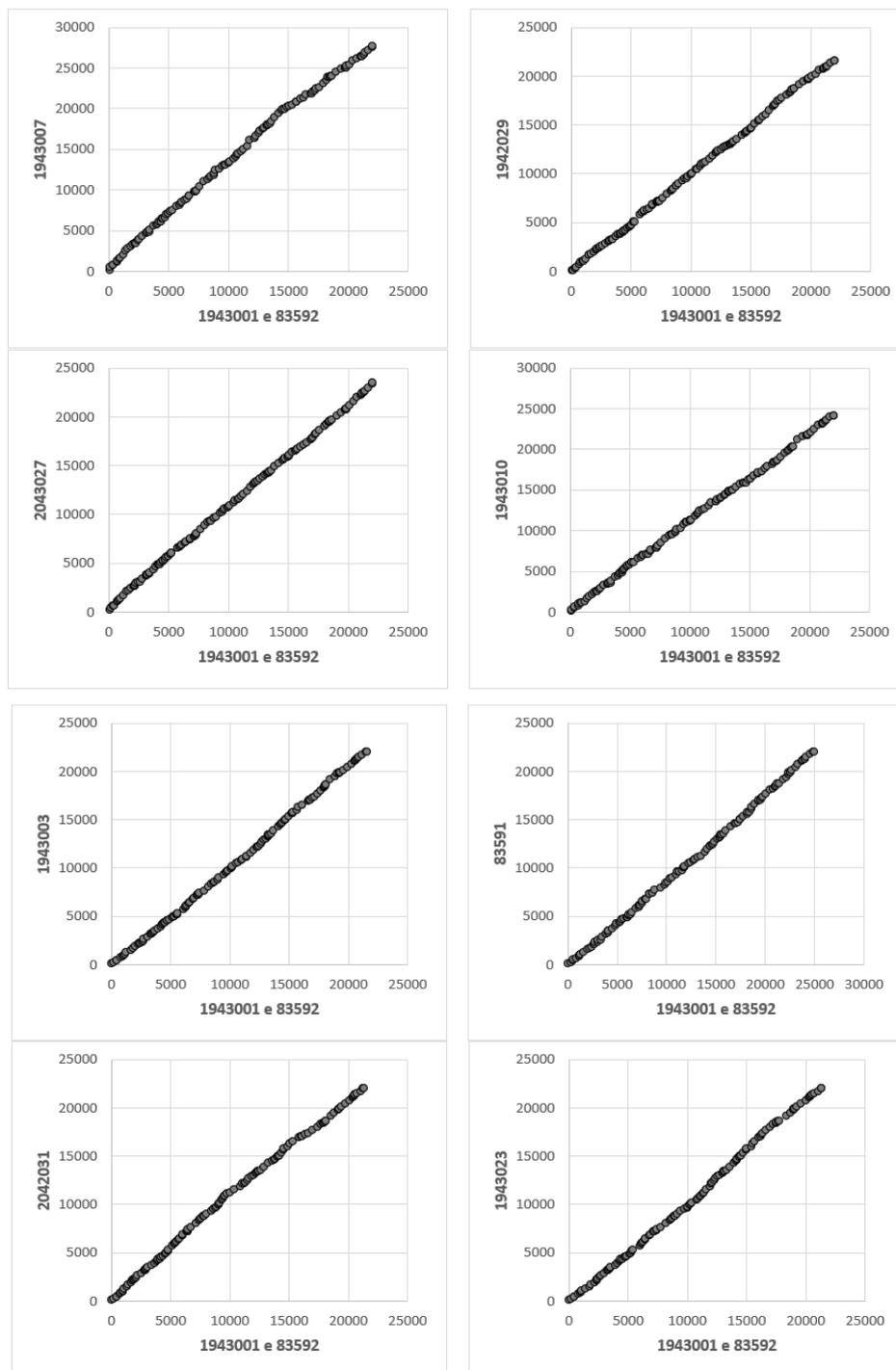
(Conclusão)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Pode-se notar que as regressões utilizando a estação 1943001 (rio Piracicaba - RP) foram as que tiveram o  $R^2$  mais próximo de 1 e, portanto, esta estação foi a mais utilizada para a realização do preenchimento das falhas. Isto pode ser explicado pelo fato de que esta estação se encontra na bacia do rio Piracicaba/MG, enquanto a estação 83592 (Caratinga - CA) é externa a bacia. Após ter sido realizado o preenchimento, foi feita a análise de consistência pelo método

dupla massa, a fim de constatar se os dados eram coerentes. Foram criados gráficos para construção da curva duplo acumulativa, associando a média acumulada das estações 1943001 (RP) e 83592 (CA) com os totais mensais acumulados de cada estação preenchida (Figura 12).

Figura 12: Gráficos da análise de consistência das estações preenchidas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Se os valores da estação a ser consistida forem proporcionais aos observados na base de comparação, os pontos devem se alinhar segundo uma única reta. Portanto, percebe-se na Figura 12 que os pontos das estações preenchidas estão alinhados seguindo praticamente uma reta, indicando que este preenchimento está consistente.

## 7.2 Análise de eventos extremos

Os dados dos eventos extremos, ocorridos nos municípios que compõem a bacia, registrados no S2iD, foram obtidos para o período de 2000 a 2019. Estes eventos foram separados por datas, para que seja possível identificar se o mesmo evento ocorreu em mais de um município da bacia.

No total, 146 eventos extremos foram catalogados na bacia por meio do S2iD, tanto eventos de precipitação intensa, quanto de seca. Contudo, foram separados os municípios com datas de eventos para o período de estudo, conforme apresentado no Tabela 3.

Tabela 3: Municípios com ocorrência de eventos extremos na bacia do rio Piracicaba/MG para o período deste estudo.

<b>Município selecionados</b>	<b>Número de eventos selecionados</b>	<b>Tipo de evento</b>	<b>Datas dos eventos selecionados</b>
Antônio Dias	2	Cheia	16/01/2003, 14/12/2005
Bela Vista de Minas	1	Cheia	15/01/2003
Coronel Fabriciano	2	Cheia	15/12/2005, 20/12/2013
Ipatinga	1	Cheia	22/12/2013
Itabira	1	Cheia	16/01/2003
Jagaraçu	2	Cheia	14/01/2003, 15/12/2005
Mariana	2	Cheia	15/12/2005, 05/11/2015
Marliéria	2	Cheia	15/01/2003, 15/12/2005
Nova Era	1	Cheia	16/01/2003
Ouro Preto	2	Cheia	14/12/2005, 07/11/2015
Santana do Paraíso	1	Cheia	15/12/2005
São Domingos do Prata	1	Cheia	16/01/2003
Timóteo	3	Cheia	16/01/2003, 15/12/2005, 21/12/2013

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Do total de eventos foram selecionados 5 que ocorreram em mais de um município da bacia: 15/01/2003, 16/01/2003, 15/12/2005, 21/12/2013 e 22/12/2013. Estes eventos foram utilizados para a análise comparativa com os dados dos satélites. Contudo, no Apêndice A apresenta-se uma análise de outros eventos ocorridos na bacia que tiveram impactos socioambientais significativos, juntamente com a análise dos sistemas meteorológicos deflagradores. Pode-se notar que todos os eventos extremos de precipitação ocorreram no período de verão (mês de janeiro ou dezembro) e estiveram associados com a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul.

Após essa seleção, os dados foram organizados por cada estação meteorológica e os acumulados diários e mensais foram calculados para todas as estações para cada evento selecionado. Posteriormente, foi calculada a anomalia de precipitação em porcentagem, selecionando a estação com maior acumulado de precipitação nos dias dos eventos selecionados. A anomalia foi calculada, portanto, tomando-se o acumulado diário da estação selecionada em relação ao acumulado mensal (Tabela 4).

Tabela 4: Análise da precipitação observada nas estações meteorológicas para os eventos extremos selecionados.

<b>Data do Evento</b>	<b>Média do acumulado diário (mm/dia) nas estações</b>	<b>Média do acumulado mensal (mm/mês) nas estações</b>	<b>Anomalia percentual da precipitação (%) para a estação com maior acumulado diário</b>
15/01/2003	43,55	521,00	16,71
16/01/2003	64,31	521,00	21,13
15/12/2005	54,04	268,14	54,21
21/12/2013	26,13	542,02	14,82
22/12/2013	74,91	542,02	16,03

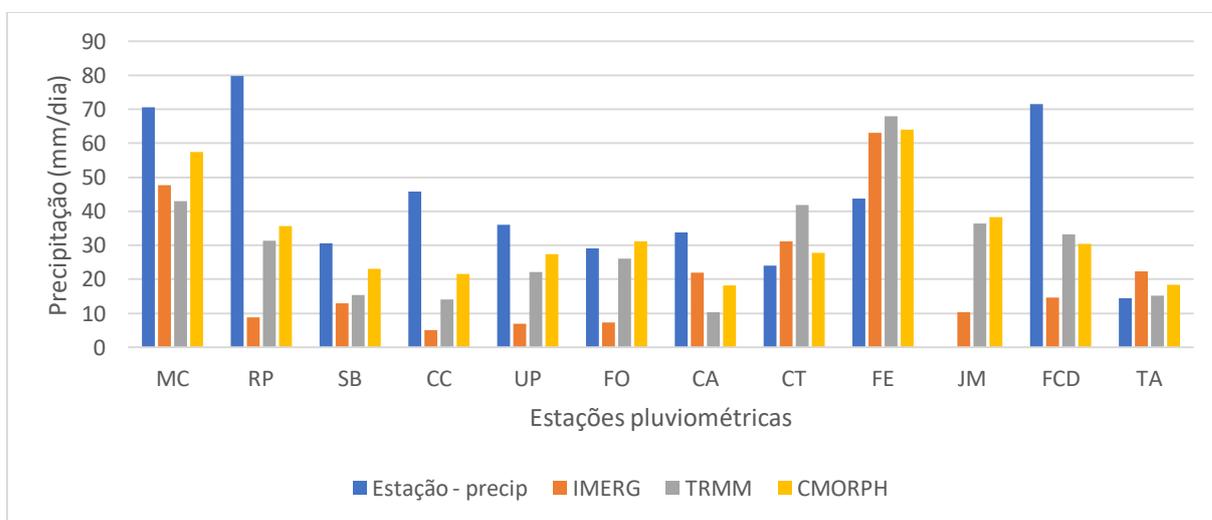
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

O evento mais significativo foi o do dia 15/12/2005, o qual choveu 200,2 mm, representando 54,21% do que choveu durante o mês na estação Mário de Carvalho (MC) em Coronel Fabriciano, localizada dentro da bacia do rio Piracicaba.

De acordo com o arquivo disponível no S2id do dia 15/12/2005, a cidade de Coronel Fabriciano sofreu com uma chuva intensa de 4 horas após vários dias de chuvas leves. Os desastres desse dia podem-se associar também a cortes irregulares em terrenos de solo arenoso, contenção ausente ou ineficaz de encostas e também devido ao sistema de drenagem inapropriado. Muitas famílias de baixa renda foram atingidas diretamente. Foi estimado em cerca de 25.750 o número de pessoas que foram afetadas, na qual 2 foram a óbito.

Posteriormente a esta análise, foi elaborada uma planilha no qual os eventos foram separados por dia. Foi feita uma comparação ponto a pixel dos dados diários de precipitação das estações meteorológicas e dos satélites IMERG, TRMM e CMORPH, no qual foi possível visualizar as diferenças nas escalas diária e mensal, conforme Figura 13 à Figura 17.

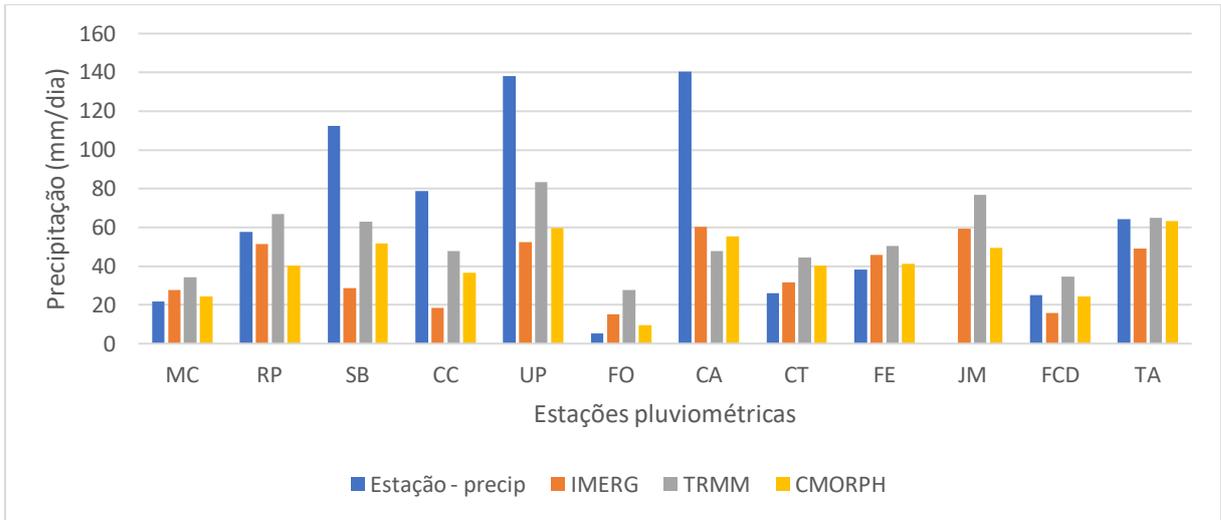
Figura 13: Análise de precipitação do dia 15/01/2003.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Pode-se observar que no dia 15/01/2003, os produtos de satélites em 7 estações subestimaram os valores de precipitação, no qual o CMORPH, seguido pelo TRMM, foi o que mais se aproximou dos valores observados nas estações meteorológicas. As maiores diferenças entre os dados observados e os produtos de satélites podem ser notados nas estações Fazenda Cachoeira D'Antas (FCD) e rio Piracicaba (RP), as quais também receberam os maiores volumes de precipitação.

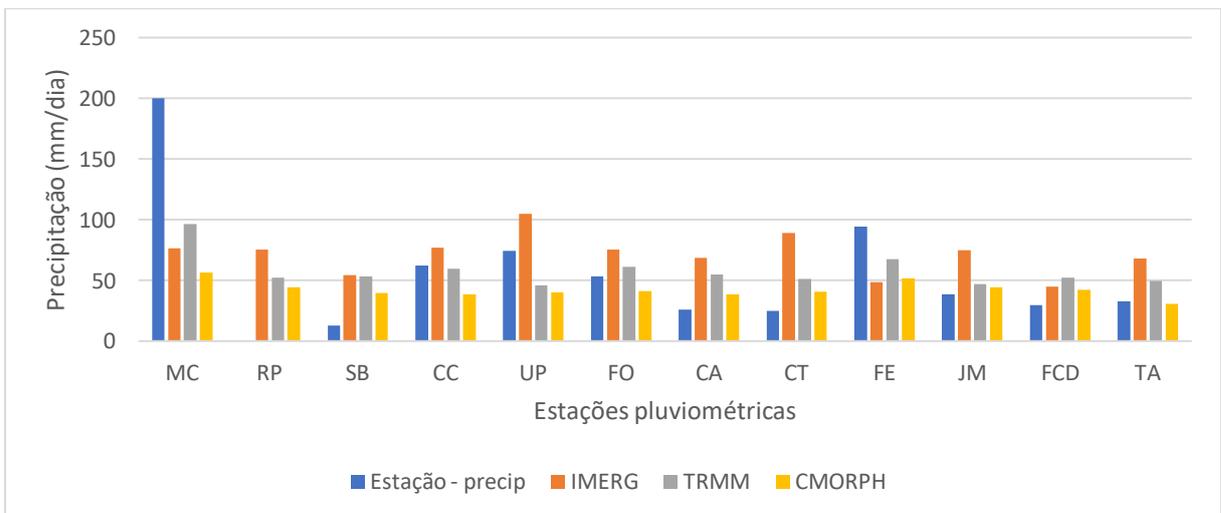
Figura 14: Análise de precipitação do dia 16/01/2003.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

No entanto, no dia 16/01/2003, a maior parte dos produtos de satélites, especialmente o TRMM, superestimaram os valores observados em 5 estações meteorológicas. Pode-se notar que os maiores volumes de chuva neste dia foram registrados nas estações com maior altitude (Usina Peti - UP, Caeté - CA, Santa Bárbara - SB, Colégio Caraça - CC). Estas estações foram as que apresentaram maiores diferenças em relação aos produtos de satélite, especialmente o IMERG. Isto pode indicar uma limitação dos produtos de satélites em estimar adequadamente altas taxas de precipitação, bem como quando esta ocorre em locais com maiores elevações. Kim *et al.* (2016) encontraram que o TRMM tem melhor performance em locais com baixas altitudes.

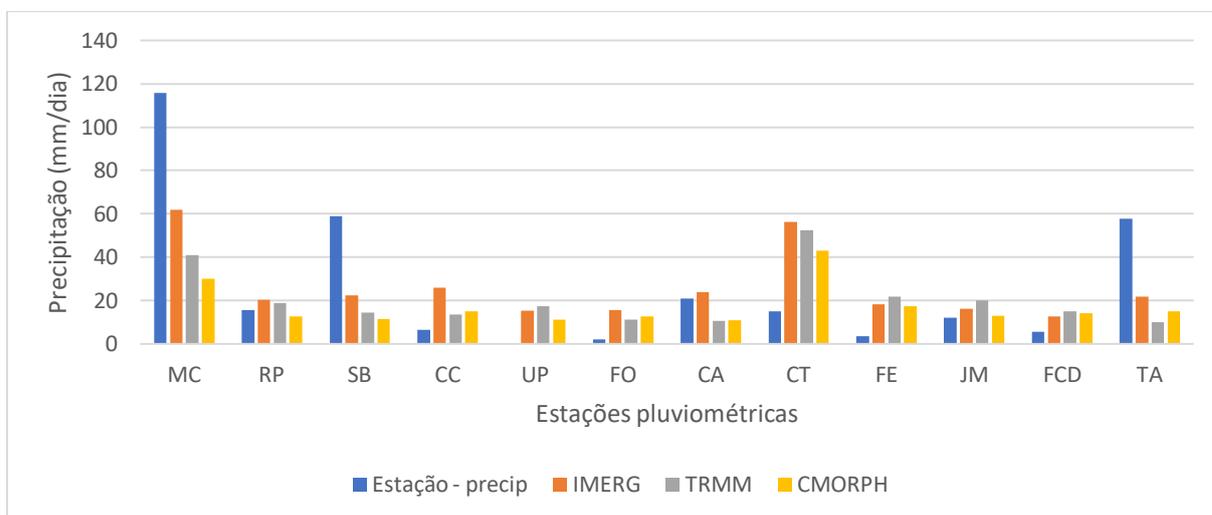
Figura 15: Análise de precipitação do dia 15/12/2005.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

No dia 15/12/2005 pode-se notar na Figura 15 que em 4 estações os produtos de satélites, especialmente o IMERG, superestimaram os valores observados nas estações. Nesse dia a estação Mário de Carvalho (MC) em Coronel Fabriciano foi que apresentou uma maior diferença entre os produtos de satélite, especialmente o CMORPH, visto que a mesma foi também a que recebeu maior volume de precipitação na data deste evento em relação as outras estações meteorológicas. Como a estação MC se encontra em uma baixa altitude em relação a todas as outras estações, o que poderia indicar que há uma limitação maior dos produtos de satélite quando existe uma precipitação extrema (com grandes volumes).

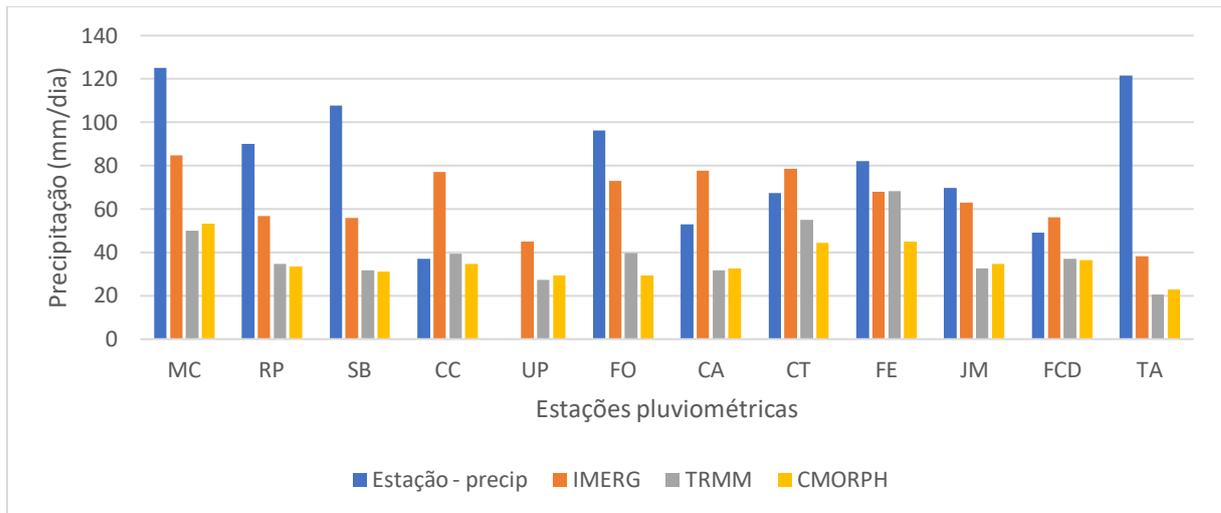
Figura 16: Análise de precipitação do dia 21/12/2013.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

No dia 21/12/2013, os produtos de satélites, em sua maior parte, superestimaram a precipitação observada (Figura 16). Novamente, a estação MC apresentou o maior volume de precipitação e a maior diferença em relação aos produtos de satélites, especialmente o CMORPH, como visto no evento anterior de 15/12/2005.

Figura 17: Análise de precipitação do dia 22/12/2013.



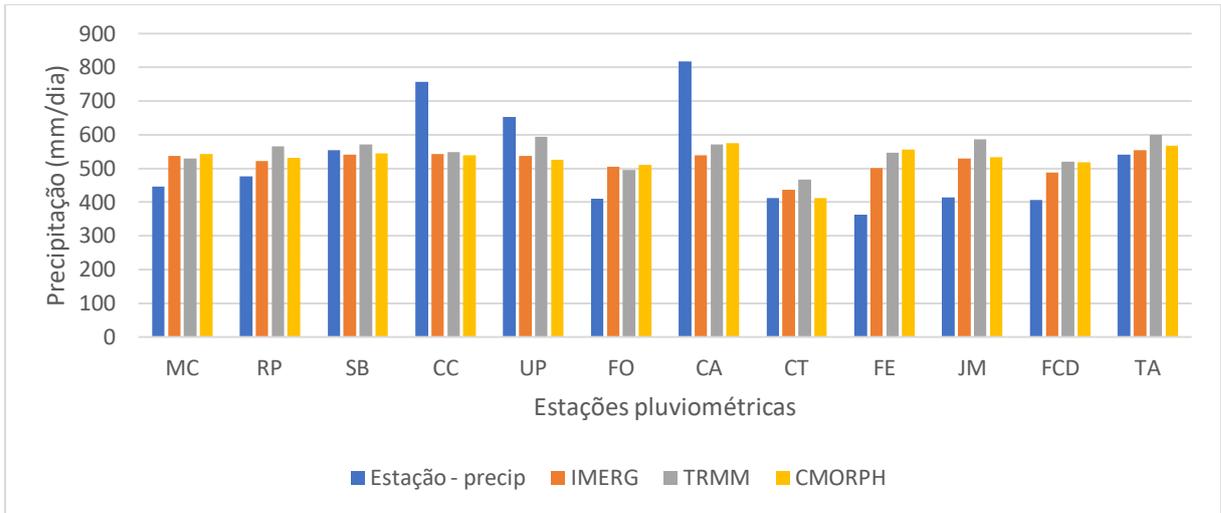
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

No dia 22/12/2013 todas as estações apresentaram volumes de precipitação mais similares do que observado no caso dos eventos extremos anteriores. Pode-se notar grande diferença entre a precipitação observada e os produtos de satélites para as estações MC, RP, SB e Taquaraçu (TA), as quais receberam os maiores acumulados diários (Figura 17). Assim, pode-se concluir pela análise dos eventos extremos selecionados, que os produtos de satélite, de forma geral, não apresentam boa performance na bacia quanto mais extrema a precipitação (acima de 100 mm diária).

Com relação a escala mensal dos eventos, pode-se observar que os acumulados de precipitação observados nas estações meteorológicas se encontram muito próximos dos produtos de satélites, indicando, que, nesta escala, as estimativas de satélites apresentam menores desvios (

Figura 18 a Figura 20).

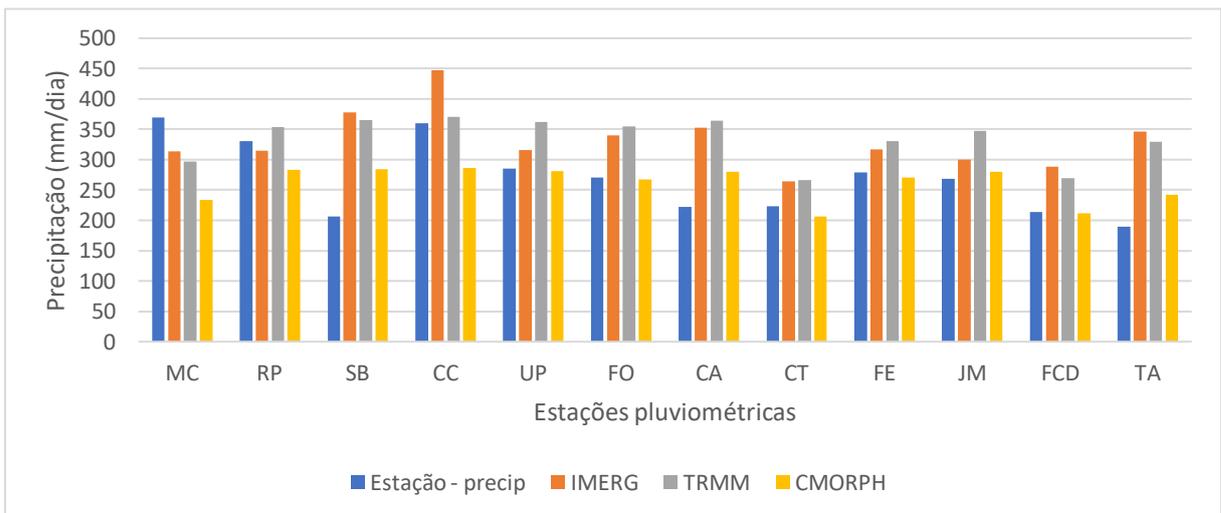
Figura 18: Análise de precipitação do mês de janeiro/2003.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

No mês de janeiro de 2003 (Figura 18), as estações que apresentaram uma diferença maior em relação as demais foram a CC (Colégio Caraça) e a estação CA (Caeté), as quais apresentaram precipitação superior a 700 mm, sendo que todos os produtos de satélites subestimaram os valores observados nestas estações. Como visto na Figura 14, somente no dia 16/01 a estação CA registrou 140,30 mm de chuva e os produtos de satélite estimaram uma precipitação bem inferior a este valor (variando entre 47,82 e 60,17 mm).

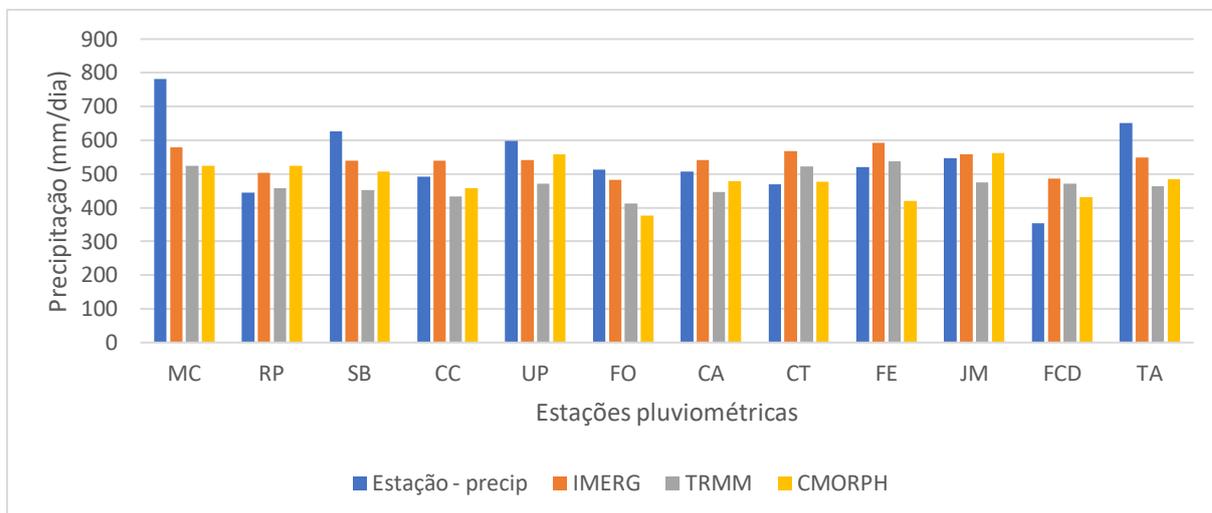
Figura 19: Análise de precipitação do mês de dezembro/2005.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Já em dezembro de 2005 (Figura 19) somente na estação MC os dados observados foram superiores aos estimados por meio dos produtos dos satélites. Nas outras estações, pelo menos um produto de satélite ficou superior aos dados observados nas estações.

Figura 20: Análise de precipitação do mês de dezembro/2013.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

No mês de dezembro de 2013 (Figura 20), os dados de precipitação dos diferentes produtos de satélites foram similares na maior parte das estações pluviométricas, com destaque para a estação MC, SB e TA, cujos acumulados foram superiores a 600 mm, acima do estimado pelos produtos de satélites, sendo que o IMERG foi o que mais se aproximou dos dados observados.

Gadelha (2018) no seu estudo de comparar as estimativas diárias, mensal e anual de precipitações do IMERG no Brasil todo, percebeu que esse produto exibiu resultados melhores na escala mensal quando comparado a escala diária, assim como aconteceu nessa pesquisa.

### 7.3 Análise comparativa da precipitação em escala anual

#### 7.3.1 Comparação Ponto a Pixel

Foi feita uma análise ponto a pixel das médias anuais das estações e dos satélites. Os pontos são os dados das estações e os pixels corresponderam as estimativas de precipitação dos produtos de satélite, abrangendo uma área de 0,1° x 0,1° onde cada estação se localiza. Para fazer essa comparação é necessário associar as coordenadas das estações aos pixels georreferenciados dos satélites onde estas estações se localizam. Isto foi realizado no programa QGIS, o qual permitiu extrair os valores correspondentes a cada pixel que abrangia a estação

analisada. Cabe ressaltar que nenhum pixel abrangeu mais de uma estação. Após isso, o Pbias ou viés relativo foi calculado para verificar a performance dos produtos de satélites. O resultado é apresentado na Tabela 5. O intervalo de classificação dos resultados para o Pbias é apresentado no Quadro 1.

Tabela 5: Análise ponto a pixel da precipitação média anual.

Estações	Precipitação em cada ponto das estações(mm/ ano)	IMERG	Pbias	TRMM	Pbias	CMORPH	Pbias
		(mm/ano)	IMERG (%)	(mm/ano)	TRMM (%)	(mm/ano)	CMORPH (%)
MC	162,42	176,02	8,37	181,56	11,78	160,83	0,98
RP	181,34	188,31	3,84	189,44	4,47	169,59	6,48
SB	207,4	196,49	5,26	188,44	9,14	161,80	21,99
CC	229,35	199,32	13,09	190,94	16,75	163,91	28,53
UP	183,14	190,05	3,77	187,71	2,50	163,93	10,49
FO	176,61	189,03	7,03	188,79	6,90	164,80	6,69
CA	181,88	199,87	9,89	185,89	2,20	154,22	15,21
CT	150,07	167,08	11,33	170,21	13,42	153,13	2,04
FE	162,38	176,59	8,75	179,75	10,70	152,54	6,06
JM	187,78	187,37	0,22	188,15	0,20	168,76	10,13
FCD	160,55	177,32	10,45	178,88	11,42	158,51	1,27
TA	160,49	190,20	18,51	180,91	12,72	151,21	5,78

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Quadro 1: Intervalo de classificação dos resultados para o Pbias ou viés relativo.

Referência	Classificação
$ PBIAS  < 10\%$	Muito Bom
$10\% \leq  PBIAS  < 15\%$	Bom
$15\% \leq  PBIAS  < 25\%$	Satisfatório
$ PBIAS  \geq 25\%$	Insatisfatório

Fonte: Van Liew et al. (2007).

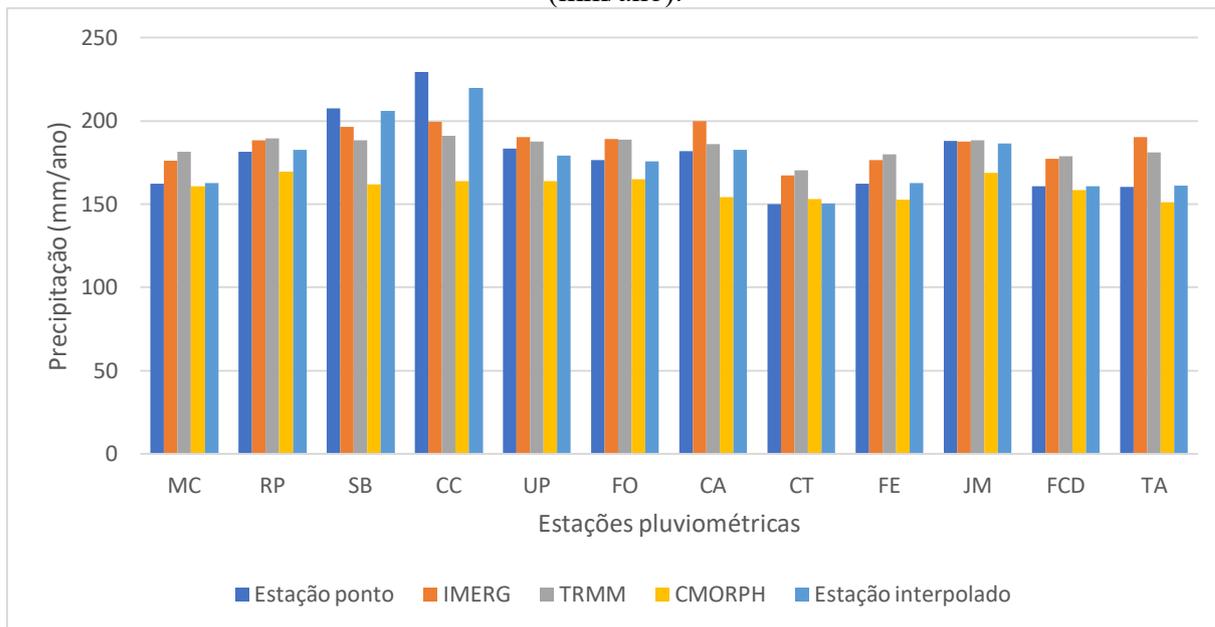
Nesta análise em escala anual, pode-se observar, de acordo com a Tabela 5, que os maiores valores de Pbias foram encontrados para o CMORPH nas estações SB (Santa Bárbara - 21,99%) e CC (Colégio Caraça - 28,53%). De acordo com o Quadro 1 este resultado é considerado insatisfatório. Deve-se ressaltar que a estação do Colégio Caraça é que se encontra em maior altitude e a que apresenta o maior volume de precipitação média anual, o que pode indicar a dificuldade deste produto de satélite em representar a precipitação em locais elevados com maior precipitação. Além disso, pode-se verificar que o CMORPH subestima a precipitação média anual em todas as estações, com exceção de Caratinga (CA).

Já o IMERG apresenta o maior Pbias para a estação TA (Taquaraçu – 18,51%); resultado considerado satisfatório de acordo com a Quadro 1. Finalmente, o TRMM, assim como o CMORPH, apresenta o maior Pbias para a estação CC (Colégio Caraça – 16,75%); resultado considerado satisfatório (Quadro 1). Pode-se verificar também que, tanto o IMERG, quanto o TRMM, superestimam a precipitação média anual para a maior parte das estações (Tabela 5).

QUEDI; CAMPOS e FAN (2018) estudaram a estimativa de precipitações diárias do IMERG na bacia do rio São Francisco, e observaram que regiões com maiores precipitações anuais apresentaram menores índices de correlação com os dados observados e também maiores erros, sendo que o IMERG subestimou a precipitação na área de estudo.

A Figura 21 apresenta visualmente uma comparação ponto a pixel entre as estações e os produtos de satélite na escala anual, abrangendo a análise dos pixels obtidos com a interpolação das estações.

Figura 21: Análise ponto a pixel para a média dos 19 anos de precipitação acumulada mensal (mm/ano).



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Primeiramente, pode-se notar na Figura 21 que a interpolação das estações pelo método bilinear é bastante satisfatória, havendo apenas uma diferença mais notável na estação CC (Colégio Caraça), a qual, como mencionada anteriormente, é a que apresenta maior altitude e maiores volumes pluviométricos anuais. Pode-se verificar também que, com exceção das estações MC (Mário de Carvalho) e CA (Caratinga), localizadas em baixas altitudes, o CMORPH subestima

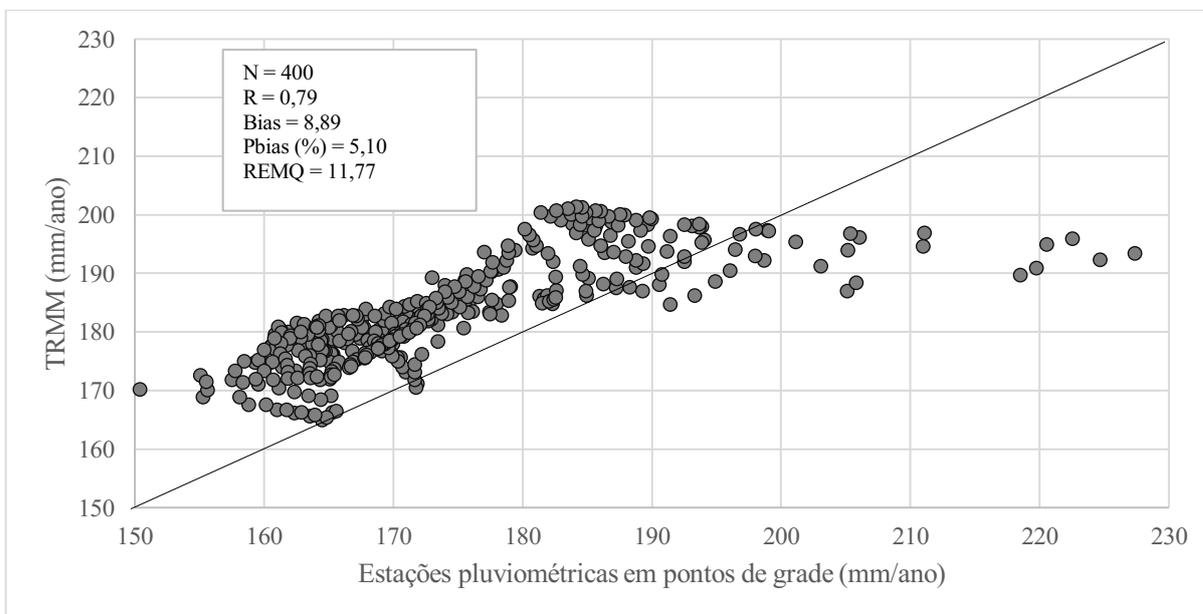
as precipitações médias, como notado anteriormente, enquanto o IMERG e TRMM superestimam em todas as estações, com exceção de SB (Santa Bárbara) e CC, localizadas em altitudes mais altas.

### *7.3.2 Comparação Pixel a Pixel*

Nesta análise considerou-se os dados interpolados das estações meteorológicas na grade 0,1° x 0,1°. Assim, os dados de precipitação de todos os pixels das estações interpoladas e dos satélites, bem como da área do entorno da bacia foram organizados em uma planilha. A área criada para compor a bacia do rio Piracicaba apresentou ao todo 400 pixels. Foram criados 3 gráficos de dispersão (Figura 22 à

Figura 24) para mostrar a relação das estações em ponto de grade e os 3 produtos de satélites para a precipitação média anual. Os indicadores estatísticos propostos neste estudo também foram inseridos nestes gráficos de dispersão.

Figura 22: Análise Pixel a Pixel entre as estações e o TRMM.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Pode-se observar na Figura 22 que a correlação calculada entre as estações e o satélite TRMM é igual a 0,79, valor este considerado estatisticamente significativo ao nível de 99% para o número de amostras (N=400 pixels), considerando a média dos 19 anos de precipitação acumulada mensal. Foi calculado também o Bias e o Pbias ou viés relativo dessa mesma relação, no qual o Bias apresentou o valor de 8,89 e o Pbias de 5,10%.

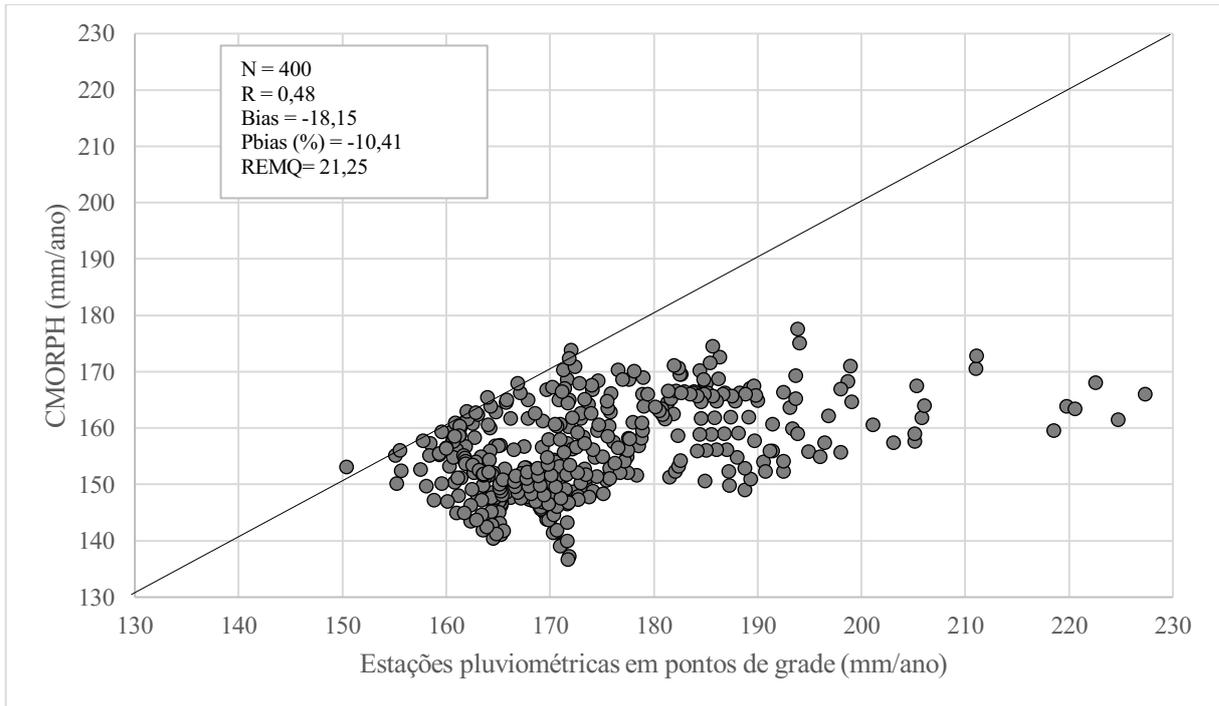
De acordo com a Tabela 1, apresentada anteriormente, este valor de Pbias abaixo de 10% é considerado muito bom. Portanto, estes resultados indicam que o TRMM superestima a precipitação média, como pode ser observado claramente pelo Figura 22, onde a maior parte dos pontos se localiza na parte superior da reta que divide o gráfico de dispersão. Finalmente, o erro médio (REMQ) calculado dessa relação, é de 11,77, o qual também é considerado muito bom, representando em porcentagem um erro de 6,7%.

Os pontos com precipitação acima de 200 mm correspondem as estações do CC e SB, bem como outros pontos próximos a estas estações, as quais se encontram localizadas em altitudes mais elevadas, indicando novamente que quanto maior o volume de chuva, maior a dificuldade do produto de satélite representar a precipitação.

A Figura 23 apresenta o comparativo com o CMORPH. Pode-se verificar que os resultados não são muito satisfatórios, sendo que a correlação é de 0,48, que é um valor inferior ao encontrado para o TRMM, porém, ainda estatisticamente significativo ao nível de 99%.

O Pbias é de -10,41% (classificação boa), mostrando que o CMORPH subestima os valores de precipitação, estimando, assim, que choveu menos do que a realidade apresentada nas estações. Isto pode ser visto claramente na Figura 23, onde a maior parte dos pontos se localiza na parte inferior da reta que divide o gráfico de dispersão. Por fim, o erro médio (REMQ) calculado dessa relação é de 21,25, representando em porcentagem 12,2 %, sendo bem maior que a do satélite TRMM.

Figura 23: Análise Pixel a Pixel entre as estações e o CMORPH.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

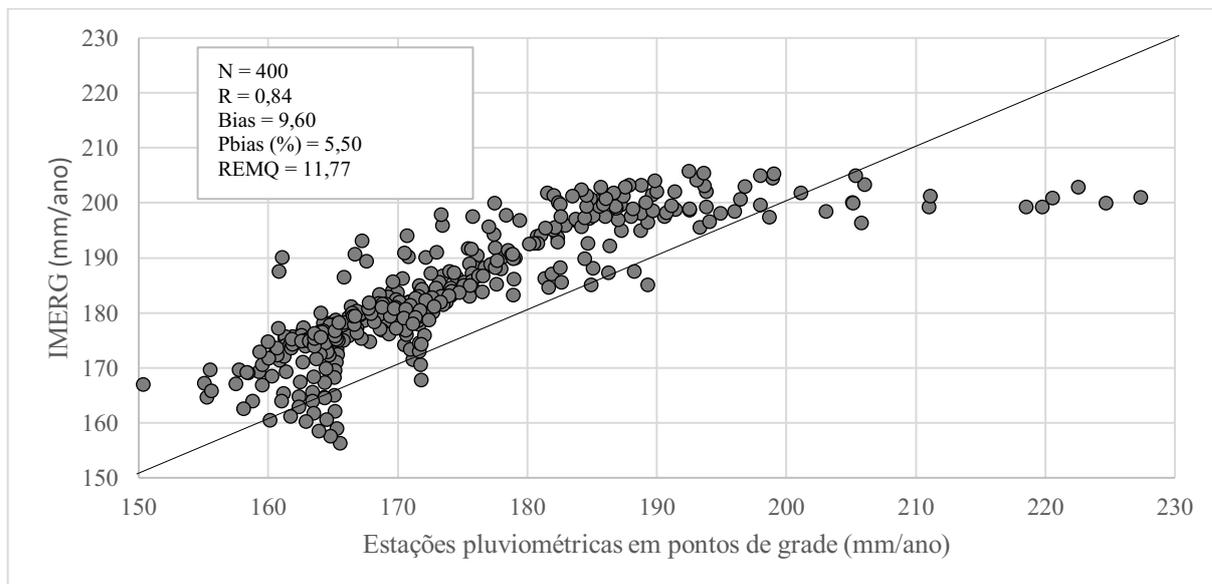
Finalmente, a

Figura 24 apresenta o comparativo com o IMERG. Pode-se verificar que os resultados apresentaram similaridade com os do TRMM, sendo a correlação de 0,84, a qual é a melhor dos três produtos. O Bias apresenta valor de 9,60 e o Pbias de 5,50%, sendo considerado muito bom no intervalo de classificação. O REMQ desta análise é de 11,77, representando 6,7 % de erro médio, exatamente igual ao TRMM. Observando a Figura 22 e a

Figura 24, é possível ver que o IMERG, assim como o TRMM, superestima a precipitação média, uma vez que a maior parte dos pontos se localizam na parte superior da reta que divide o gráfico de dispersão.

Pode-se verificar que os pontos com precipitação acima de 200 mm foram subestimados por todos os produtos de satélite analisados, sendo que o CMORPH foi o que apresentou a maior subestimação e o IMERG a menor. Como mencionado anteriormente, estes pontos correspondem a localização das estações do CC e SB, bem como outros pontos próximos a elas, as quais se encontram localizadas em altitudes mais elevadas, indicando, novamente, que quanto maior o volume de chuva e maior a altitude, maior a dificuldade dos produtos de satélite analisados representarem adequadamente a precipitação.

Figura 24: Análise Pixel a Pixel entre as estações e o IMERG.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

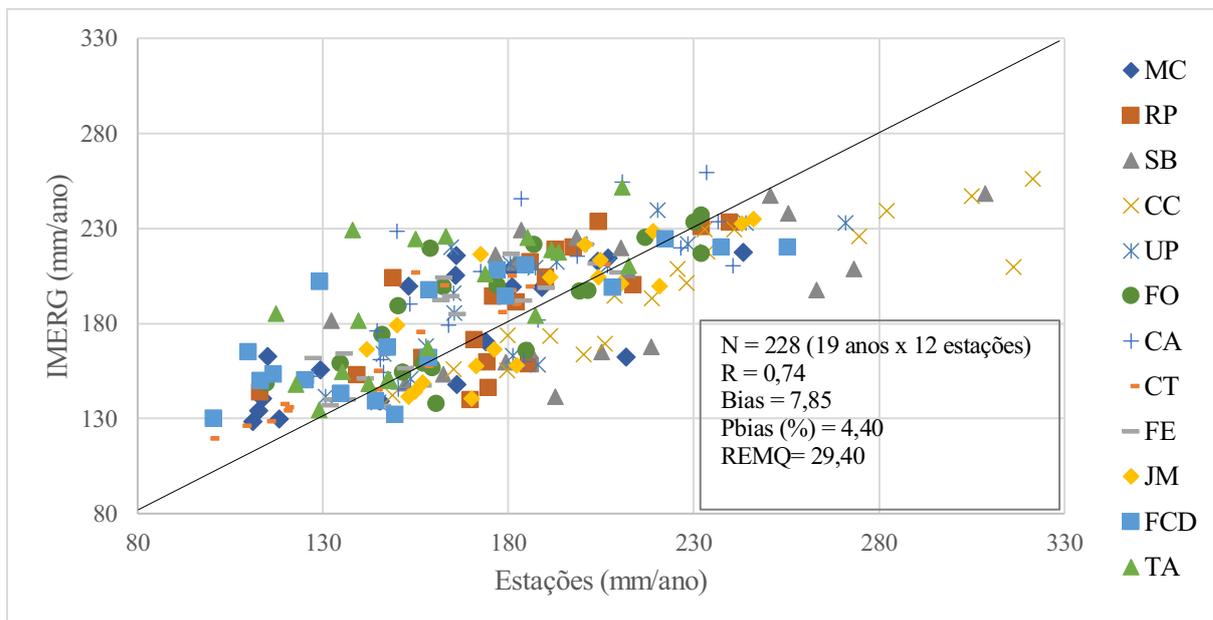
Deve-se ressaltar também, que os gráficos do TRMM e IMERG possuem os eixos de x e y com os mesmos valores. Já o gráfico do CMORPH não apresenta esses mesmos valores de eixos, pois este produto subestimou a precipitação média, apresentando pontos com valores abaixo de 150 mm/ano.

#### 7.4 Análise comparativa da precipitação em escala interanual

Foi realizada também uma análise pixel a pixel da precipitação média considerando cada ano hidrológico e não a média dos 19 anos da série histórica como na análise anterior. Para obtenção dos pontos de precipitação média para cada ano hidrológico nos produtos de satélite foi utilizado o programa *Panoply* 4.10.12 da NASA.

Portanto, foi calculada a média do acumulado mensal para cada ano hidrológico de cada estação dos dados pluviométricos preenchidos e interpolados, e dos satélites para os pixels onde cada estação se localiza. A partir desses dados, foi confeccionado um diagrama de dispersão com todos os pontos. Ao total foram 228 pontos, pois são 19 anos de análise para 12 pixels correspondendo a localização das 12 estações (Figura 25, Figura 26 e Figura 27).

Figura 25: Análise interanual entre as estações e o IMERG.

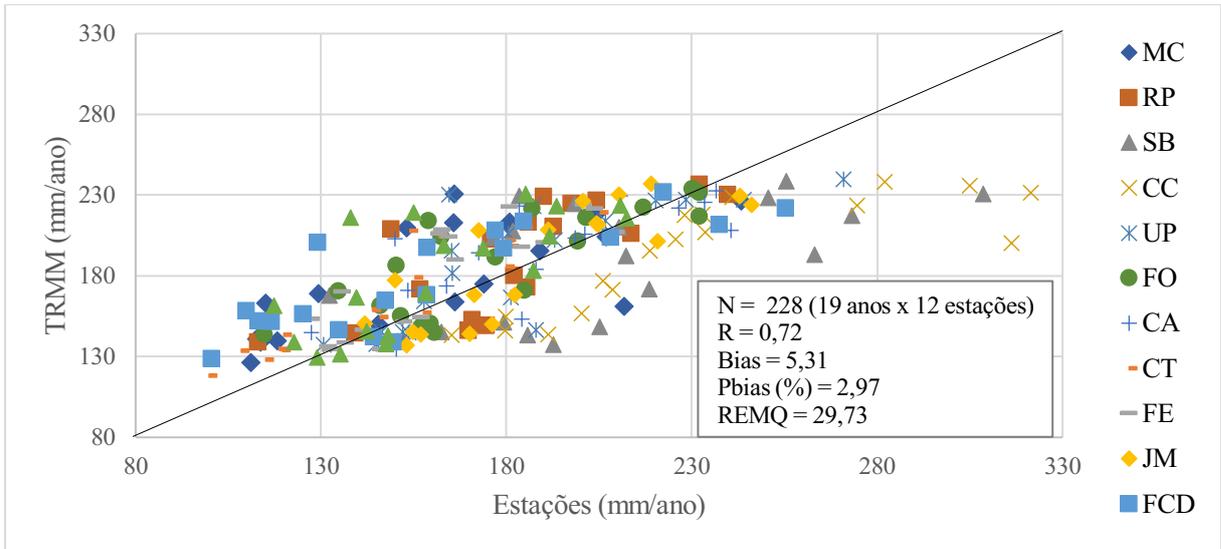


Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Pode-se verificar na Figura 25 que o IMERG apresenta uma correlação de 0,74 com as estações, valor abaixo do encontrado anteriormente (0,84) para a média dos 19 anos, mas ainda estatisticamente significativa ao nível de 99%. O Pbias, no entanto, diminuiu para 4,40%, e o REMQ aumentou para 29,40 em comparação com a análise anterior. Pode-se notar que o IMERG subestima em todos os anos a precipitação no Colégio Caraça (CC), que é a estação com maior altitude. Por outro lado, o IMERG superestima em todos os anos a precipitação em Caratinga (CT), que é uma estação localizada fora da bacia de estudo.

A análise interanual apresenta maior dispersão dos dados, o que pode ser verificado visualmente na Figura 25 e Figura 26. Contudo, ainda, assim, a classificação da performance do IMERG continua sendo muito boa.

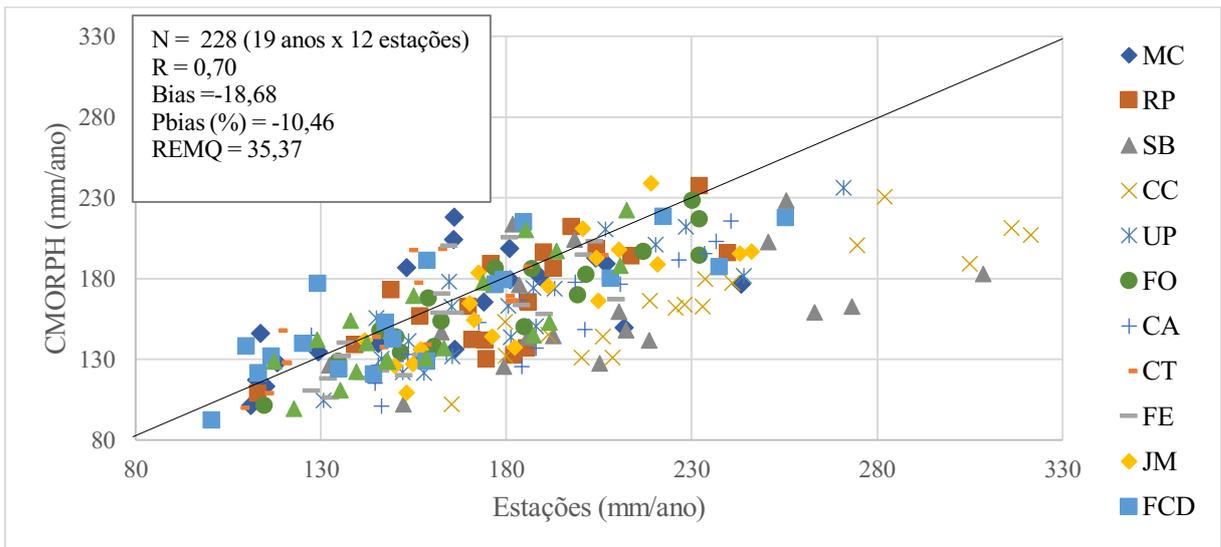
Figura 26: Análise interanual entre as estações e o TRMM.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

O TRMM apresenta uma correlação de 0,72 com as estações (Figura 26), também inferior ao encontrado na análise para a média dos 19 anos. Em relação a análise anterior, o Pbias diminuiu para 2,97% e o REMQ aumentou para 29,73. Novamente, pode-se notar que o TRMM subestima em todos os anos a precipitação no CC, como visto para o IMERG, e na maior parte dos anos em Santa Bárbara (SB). Já em CT é o oposto, como verificado para o IMERG.

Figura 27: Análise interanual entre as estações e o CMORPH.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

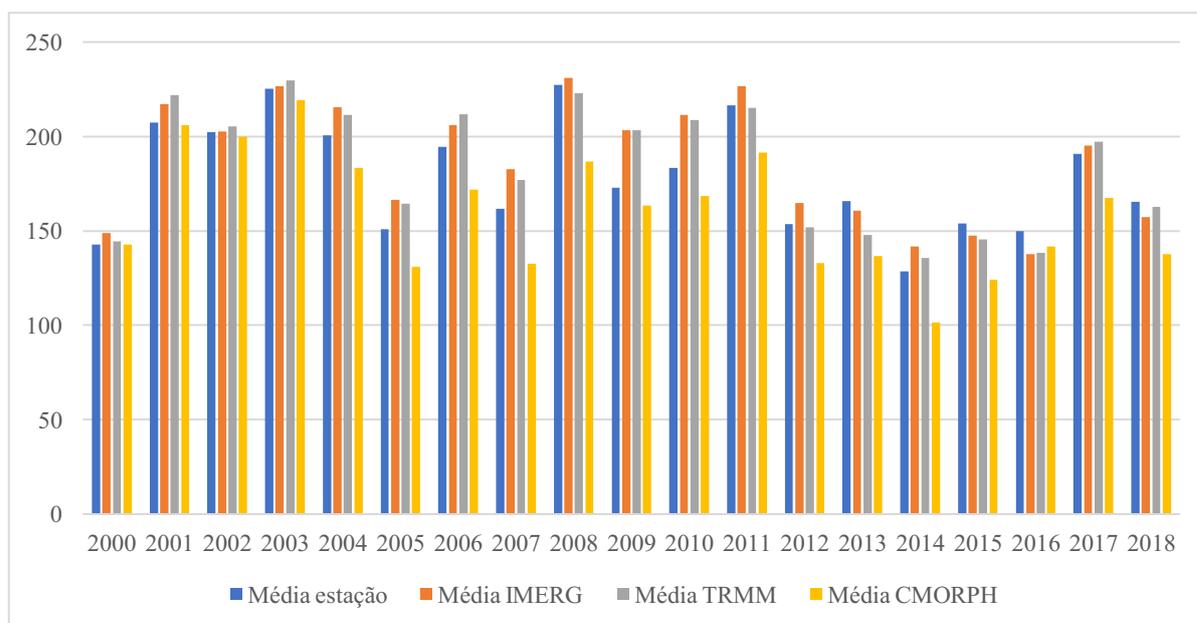
Por sua vez, o CMORPH apresentou uma correlação de 0,70, mostrando melhor desempenho em relação à análise anterior (Figura 27). Já o Pbias apresentou -10,46% diminuindo em relação

a outra análise e o REMQ aumentou para 35,37. A maior parte das estações tem sua precipitação subestimada pelo CMORPH, especialmente CC e SB.

Finalmente, pode-se dizer que, entre os três satélites, o IMERG e o TRMM também apresentaram melhores resultados para todos os indicadores estatísticos em relação ao CMORPH na análise interanual, assim como foi visto na análise anterior para a média dos 19 anos considerando toda a área criada para compor a bacia do rio Piracicaba, e não somente os pixels referentes às coordenadas das estações.

A Figura 28 apresenta a precipitação média para cada ano hidrológico para os produtos de satélite e para a média de todas as estações em toda a área de estudo.

Figura 28: Análise da precipitação média interanual (mm/ano) entre as estações e os produtos de satélites.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

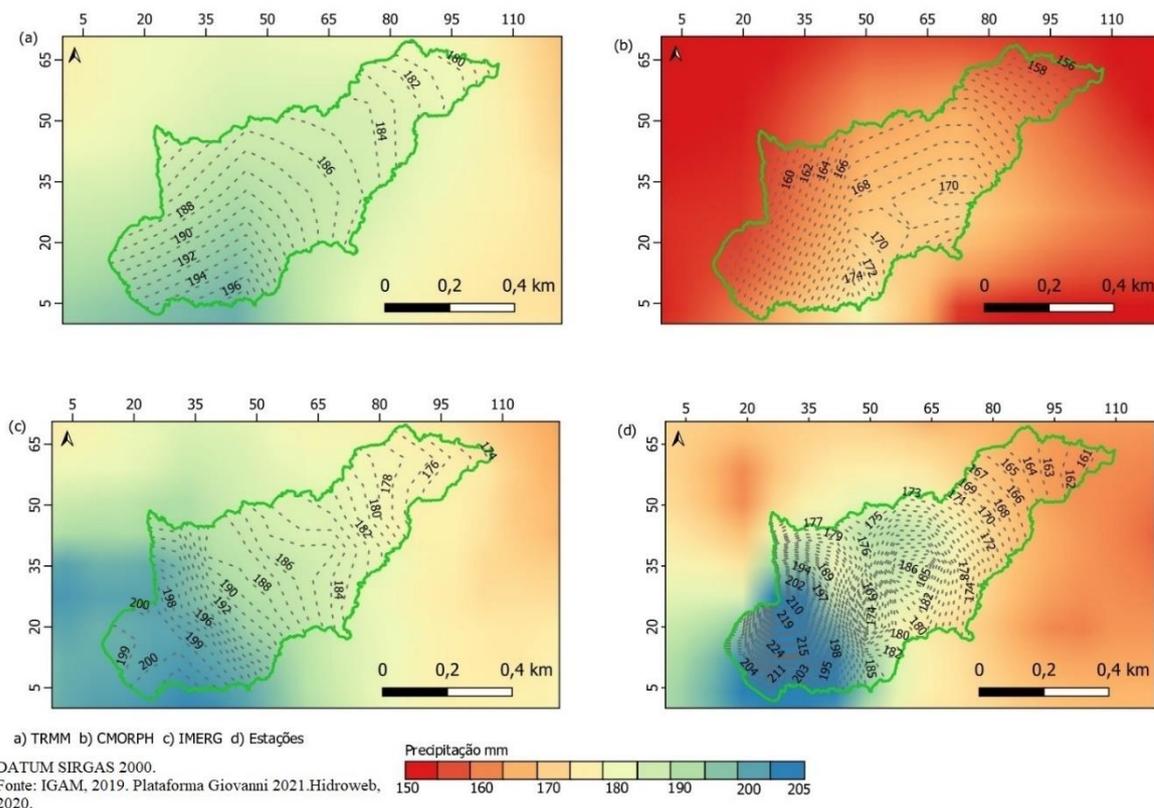
Nota-se na Figura 28 que os anos de 2000 e 2002 foram aqueles que mais apresentaram similaridade entre todos os produtos de satélites e a média de todas as estações. Para os outros anos verifica-se que o CMORPH subestima a precipitação em todos os anos, enquanto o TRMM e o IMERG apresentam maior similaridade com as estações, porém, superestimando a precipitação em quase todos os anos.

## 7.5 Análise da distribuição espacial da precipitação

Foram confeccionados 4 mapas com a precipitação acumulada mensal dos 19 anos da área de estudo para os produtos de satélites e os dados observados nas estações pluviométricas. Estes dados foram interpolados por meio da interpolação bilinear e as suas isolinhas foram extraídas (

Figura 29).

Figura 29: Mapas da distribuição espacial da precipitação média acumulada mensal (mm/mês) para os 19 anos da série histórica analisada para (a) TRMM, (b) CMORPH, (c) IMERG e (d) estações pluviométricas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Por meio da

Figura 29, pode-se observar que os dados de precipitação das estações assemelham-se bastante com os dados do IMERG, sendo que a porção sudoeste da bacia apresenta precipitação em torno

de 200 mm/mês. Nessa região todos os produtos de satélite subestimaram os valores de precipitação média, sendo o IMERG o que mais se aproximou.

Observando a parte nordeste da bacia (

Figura 29) pode-se ver a semelhança entre as estimativas de precipitação do IMERG e do TRMM, sendo que estes dois produtos superestimam a precipitação observada nesta região nas estações pluviométricas (

Figura 29 d), porém, novamente o IMERG é o que mais se aproxima do observado (

Figura 29 c).

Na parte central da bacia, o IMERG e o TRMM se assemelharam bastante ao observado nas estações, com precipitações em torno de 186 mm/mês. O produto do satélite CMORPH se distanciou de forma significativa dos demais produtos de satélite e dos dados observados, subestimando os valores de precipitação.

Interessante notar que, de acordo com o mapa topográfico elaborado (Figura 9), a porção sudoeste da bacia é que possui maior altitude e, portanto, é a que os produtos de satélite IMERG e TRMM subestimaram a precipitação. Já a porção nordeste é a mais baixa e, neste caso, os dois produtos superestimaram a precipitação. A porção central, por sua vez, é a que possui altitude intermediária, e, assim, é a que é melhor representada pelos dois produtos. Contudo, deve-se ressaltar que essa região também é que possui menor número de estações pluviométricas. No caso do CMORPH, as porções sudoeste e nordeste são subestimadas e a porção central também, porém esta, em menor intensidade.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos hidrológicos são essenciais para a gestão de recursos hídricos em uma região ou bacia hidrográfica. A disponibilidade de dados e uma série de boa qualidade e coerente é essencial para analisar os eventos extremos e para um melhor planejamento da gestão hídrica, os quais podem subsidiar ações para reduzir os impactos de inundações e secas, gerenciando os possíveis riscos em locais com maior vulnerabilidade.

Para se compreender um fenômeno em qualquer área de conhecimento, existe uma primeira etapa que é entender o fenômeno e interpretar a quantificação de suas propriedades por meio da observação e medição. Assim, os mapas permitiram aportar informações importantes para se comparar espacialmente os índices pluviométricos entre os meses e anos para cada uma das fontes de dados.

Os dados de precipitação disponíveis nas estações meteorológicas são escassos em alguns locais e muitas vezes não conseguem suprir a necessidade desses estudos, carecendo de outras fontes para a obtenção de dados que permitam realizar o monitoramento hidrometeorológico. Assim, este trabalho possibilitou avaliar o desempenho das estimativas de precipitação, oriundas de três produtos de satélites meteorológicos, na bacia hidrográfica do rio Piracicaba/MG, de modo a verificar seu potencial de utilização como uma alternativa para aplicação em estudos de eventos hidrológicos extremos e como uma ferramenta para o planejamento e gestão hídrica.

Os resultados deste trabalho mostraram que quando se considera a escala diária e mensal dos eventos extremos selecionados, pode-se perceber que os produtos de satélites se mostraram mais próximos das estações na escala mensal.

Quanto a análise Ponto a Pixel para a média dos 19 anos de precipitação acumulada mensal, pode-se verificar que o produto do CMORPH subestima as precipitações médias enquanto os produtos do IMERG e do TRMM superestimam em quase todas as estações, excluindo as estações com maiores altitudes, como no caso da estação Colégio Caraça em Catas Altas, cuja precipitação foi subestimada em todos os 19 anos. Esta é a estação com maior altitude e a que apresenta o maior volume pluviométrico na média dos 19 anos.

Na comparação Pixel a Pixel, os resultados do TRMM e do IMERG foram satisfatórios nas análises estatísticas, apresentando menores erros, melhores correlações, embora superestimando as precipitações. O CMORPH não apresentou resultados muito satisfatórios,

apresentando uma pior correlação e um erro maior que os demais produtos. Em relação à escala interanual, o IMERG e o TRMM também exibiram bons resultados para todos os indicadores estatísticos em relação ao CMORPH.

Por meio dos resultados pode-se inferir que existe uma limitação dos produtos de satélites, especialmente o CMORPH, em estimar adequadamente altas taxas de precipitação, como visto no caso dos eventos extremos, bem como quando esta ocorre em locais com maiores elevações.

Portanto, os melhores produtos indicados para a bacia em termos gerais seriam o IMERG e TRMM, especialmente na porção central da bacia. Apesar do fato destes dois produtos apresentarem limitações na estimativa (ora superestimando ou subestimando a precipitação) isso não invalida seu uso, basta que estas limitações sejam consideradas na análise dos resultados.

Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se avaliar outros produtos de satélites e também realizar análises na escala sub-diária, comparando dados horários de eventos extremos com dados horários de produto de satélite para verificar a relação dos mesmos em análises mais detalhadas.

Além disso, estudos que avaliem a precisão das estimativas de precipitação por satélites contribuem para melhorar estes produtos, além de serem de fácil acesso e gratuitos, podendo auxiliar diversos órgãos em fins práticos. No caso deste trabalho, pode-se notar que as estimativas perdem precisão em locais com topografia complexa, como é o caso da bacia do rio Piracicaba/MG.

## REFERÊNCIAS

ABREU, M. L. **Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais: de Nimer (1977) à zona de convergência do atlântico sul.** Geonomos, 6(2): 17-22, 1998.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos: desafios para a gestão. 2010.** Disponível em: <[http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20151106083606\\_Os%20Efeitos%20das%20Mudan%C3%A7as%20Clim%C3%A1ticas%20sobre%20os%20Recursos%20H%C3%ADdricos%20%20desafios%20para%20a%20gest%C3%A3o\\_Link%20dentro%20do%20texto%20da%20apresenta%C3%A7%C3%A3o.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20151106083606_Os%20Efeitos%20das%20Mudan%C3%A7as%20Clim%C3%A1ticas%20sobre%20os%20Recursos%20H%C3%ADdricos%20%20desafios%20para%20a%20gest%C3%A3o_Link%20dentro%20do%20texto%20da%20apresenta%C3%A7%C3%A3o.pdf)>. Acesso em: 15 de abril de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Portal Hidroweb.** Apresentação. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em 10 de outubro de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021.** Disponível em: < <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/>>. Acesso em: 19 de julho de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **HidroSat - Monitoramento Hidrológico por Satélite.** Disponível em: <<http://hidrosat.ana.gov.br/SaibaMais/Sobre>>. Acesso em: 24 de maio de 2021.

ALMEIDA, K. N. **Análise de desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a Região Hidrográfica do rio Itapemirim.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil, 2017.

BERNARDI, E. C. S. **Qualidade das estimativas de precipitação do satélite TRMM no estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Precipitação**. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia Ciência e Aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2013. Cap. 5. p. 177-241.

BUENO, J. O. A.; BOURSCHEIDT, V. **Análise Espaço-Temporal das estimativas de precipitação do GPM/IMERG na área de captação do Sistema Cantareira**. Anais do XIX do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. ISBN: 978-85-17-00097-3. 14 a 17 de Abril de 2019.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. **Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone**. Journal of Climate. 2002. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/jcli/article-pdf/15/17/2377/3778203/1520-0442>>

CASTRO, A. L. C. **Manual de planejamento em defesa civil**. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Defesa Civil, 1999.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F.; JUSTI, M. G. A. 2009. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES ATURAIS – CEMADEN. **Histórico da criação do CEMADEN**. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/historico-da-criacao-do-cemaden/>>. Acesso em: 13 de março de 2021.

CLIMATE PREDICTION CENTER (CPC). **CPC Morphing Technique ("CMORPH")**. Disponível em: [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph\\_description.html](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph_description.html) Acesso em: 25 de janeiro de 2021.

COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; TUCCI, C. E. M. **Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a Bacia do Paraguai Superior**. Revista Brasileira de Cartografia No 59/01, (ISSN1808-0936), Abril, 2007.

CBH DOCE – COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Belo Horizonte.** Consórcio Ecoplan - Lume, 2010.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. **A Bacia.** Disponível em: <<http://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>>. Acesso em 25 de abril de 2019.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRACICABA. **A Bacia.** Disponível em: <<http://www.cbhpiracicabamg.org.br/rio-piracicabamg>>. Acesso em 25 de abril de 2019.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; DEUSDARÁ LEAL, K.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; CAL GARCIA, J. V.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. **Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019.** Atmosphere 2019, 10, 642.

CUPOLILLO, F.; ABREU, M. L.; VIANELLO, R. L. **Climatologia da Bacia do Rio Doce e sua Relação com a Topografia Local.** Geografias Artigos Científicos. Belo Horizonte 04(1) 45-60 julho-dezembro de 2008

DESCOMPLICA GIS. **QGIS: o que é, o que faz e para que serve?** Disponível em: <https://descomplicaqgis.com.br/qgis-o-que-e-o-que-faz-e-para-que-serve/>>. Acesso em: 15 de maio de 2021.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações.** 3 ed. rev. e amp. – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008.812 p.

FENSTERSFER, C. A. **Qualidade das estimativas de precipitação derivadas de satélites na Bacia do Alto Jacuí – RS.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2013.

FREITAS, A. C. V.; FRANCHITO, S. H.; RAO, V. B. **Análise dos dados de precipitação provenientes de diferentes fontes, sobre a América do Sul, com ênfase no Brasil.** CLIMEP – Climatologia e Estudos da Paisagem Rio Claro (SP) – Vol.5 – n.1, 5-18, janeiro/junho/2010.

GADELHA, A. N. **Análise da missão GPM (Global Precipitation Measurement) na estimativa de precipitação sobre território brasileiro.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, 2018.

GADELHA, A. N.; COELHO, V. H. R.; XAVIER, A. C.; BARBOSA, L. R.; MELO, D. C. D.; E, XUAN, Y.; HUFFMANG, G. J.; PETERSEN, W. A.; ALMEIDA, C. N. **Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales.** Atmospheric Research 218 (2019) 231–244, 2019.

HÉNIN, R.; LIBERATO, M. L. R.; RAMOS, A. R. GOUVEIA, C. M. **Assessing the Use of Satellite-Based Estimates and High-Resolution Precipitation Datasets for the Study of Extreme Precipitation Events over the Iberian Peninsula.** November; Water 2018, 10, 1688; doi:10.3390/w10111688.19 p.2018

HOU, A. Y.; KAKAR, R. K.; NEECK, STEVEN.; AZARBARZIN, A. A.; KUMMEROW, C. D.; KOJIMA, M.; OKI, R.; NAKAMURA, KENJI.; IGUCHI, T. **The Global Precipitation Measurement Mission.** American Meteorological Society, p. 701-722, 2014

HUFFMAN, J. G. *et al.* **Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG).** In: Levizzani V., Kidd C., Kirschbaum D., Kummerow C., Nakamura K., Turk F. (eds) Satellite Precipitation Measurement. Advances in Global Change Research, vol 67. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_19), 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Boletins Agroclimatológicos.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=agrometeorologia/boletinsAgroclimatologicos>. Acesso em: 22 de abril de 2020.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic?i=br> . Acesso em: 26/05/2020.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas.** XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP. Caxambu –MG – Brasil, de 18 a 22 de setembro de 2006.

JOYCE, R. J., J. E. JANOWIAK, P. A. ARKIN, AND P. XIE, 2004: **CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution.** J. Hydromet., 5, 487-503.

KIM, J.P.; JUNG, I.W.; PARK, K.W.; YOON, S.K.; LEE, D. **Hydrological utility and uncertainty of multi-satellite precipitation products in the mountainous region of South Korea.** Remote Sens. 2016, 8, 608.

LEVIZZANI, V. 1998. **Intense rainfall monitoring from geostationary satellites.** 9<sup>a</sup> Conference. Satellite Meteorology and Oceanography, MAS, 327-330.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. B. R. **Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil.** Theor Appl Climatol (2009) 101:121–135 DOI 10.1007/s00704-009-0207-9

LLOPART, M. **Sistemas Meteorológicos Atuantes na América do Sul.** Caderno didático Ed Abril 2012.

LOUZADA, F. L. R. O. **Balanço hídrico climatológico com dados estimados pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission para a bacia hidrográfica do Rio Doce.** 2016. Tese (Doutorado em Recursos hídricos e Geoprocessamento em sistemas agrícolas), Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2016.

MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. **Geodiversidade do estado de Minas Gerais.** – Organização. Belo Horizonte: CPRM, 2010.131 p

MACIEL, A. L.; VIEIRA, E. M.; MONTE MOR, R. C.; VASQUES, A. C. **Regionalização e espacialização de vazões de permanência: estudo aplicado na Bacia rio Piracicaba-MG.** Revista Brasileira de Climatologia. Ano 15 – Vol. 24 – JAN/JUN 2019.

MÉLLO, L. B. **Relação Intensidade-Duração-Frequência de precipitação utilizando dados de satélites.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas, 2019.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto.** 1ª. ed. Brasília: CNPq, v. 1. 2012. p. 256.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Climanálise Boletim.** Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman1/boletim/index1107.shtml>. Acesso em: 21 de abril de 2020.

MOTA, S. **Introdução a Engenharia Ambiental.** 6ª Ed. Rio de Janeiro: Abes, 2016. 526 p.  
NAGHETTINI, M. **Notas de aula de Hidrologia Aplicada.** UFMG, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, 1997.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).** Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/trmm>> Acesso em 12 de dezembro de 2020

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **IMERG: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM.** Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/data/imerg#past7daysofimergprecipitation>> Acesso em: 09 de janeiro de 2021.

NACIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - NOAA. **Precipitation – CMORPH.** Disponível em :<<https://www.ncdc.noaa.gov/cdr/atmospheric/precipitation-cmorph>> Acesso em: 25 de janeiro de 2021.

NATIVIDADE, U. A.; GARCIA, S. R.; TORRES, R. R. **Tendência dos Índices de Extremos Climáticos Observados e Projetados no Estado de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 32, n. 4, 600-614, 2017.

PARH PIRACICABA. **Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Piracicaba.** Consórcio Ecoplan – Lume, Maio, 2010.

PASSOW, M. J. TRMM —**Tropical rainfall measuring mission: Bringing remote sensing of precipitation into your classroom. TRMM: Trazendo o sensoriamento remoto de precipitação para sua sala de aula.** Terræ didática, 6(1):03-08, 2010.

PEDRO, D. F. P.; FREITAS, A. C. V.; BELOTTI, F. M. **A influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) na ocorrência de deslizamentos de massa em Belo Horizonte e cidades vizinhas.** Revista Brasileira de Climatologia. Ano 16 – Vol. 27 – JUL/DEZ 2020.

PETTY, G. W. **The status of satellite-based rainfall estimation.** Remote Sensing of Environment, v. 51, p. 125-137, 1995.

PLANO DE EMERGÊNCIA PLUVIOMÉTRICA, 2018/2019: **período 1º de outubro de 2018 a 31 de março de 2019** – Cedec/MG – Minas Gerais: GMG. 2018.

QUEDI, E. S.; CAMPOS, J. A.; FAN, F. M. **Validação de dados do Global Precipitation Mission (GPM) com observações *in situ* na bacia do rio São Francisco.** XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.2018.

REIS, A. L.; SILVA, M. S.; REGIS, M. V.; SILVEIRA, W. W.; SOUZA, A. C.; REBOITA, M. S.; CARVALHO, V. S. B. **Climatologia e eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Geografia Física v.11, n.02 ,652-660, 2018.

SANTOS, K. R. **Inundações urbanas: um passeio pela literatura.** Élisée, Rev. Geo. UEG - Goiania, v.1, n.1, p.177-190, Jan./jun. 2012.

SILLMANN, J.; THORARINSDOTTIR, T.; KEENLYSIDE, N.; SCHALLER, N.; ALEXANDER, L. V.; HEGERL, G.; SENEVIRATNE, S. I.; VAUTARD, R.; ZHANG, X.; ZWIERS, F. W. **Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities** October 2017, *Weather and Climate Extremes* 18 (2017) 65–74.

SILVA, A. A. F.; JARDIM, C. H. **Aplicação de técnicas de preenchimento de falhas de dados de pluviosidade mensal e anual para o noroeste do estado de Minas Gerais - Brasil.** *Geografias Artigos Científicos*. Belo Horizonte, 01 de julho - 31 de dezembro de 2017. Vol. 15, nº 2, 2017.

SILVA, J. J. R.; OLIVEIRA, G. A.; VIEIRA, E. M.; FREITAS, A. C. V. **Influência da expansão urbana aliada às características morfométricas nas ocorrências de inundações: estudo de caso no município de João Monlevade-MG.** *Research, Society and Development*, v. 9, n. 2, e136922101, 2020.

SODRÉ, G. R. C.; RODRIGUES, L. L. M. **Comparação entre estimativa da precipitação observada pela Técnica CMORPH e estações meteorológicas do INMET em diferentes regiões do Brasil.** *Revista Brasileira de Geografia Física* V. 06 N. 02, 2013.

TEODORO, T. A.; PASSOS, R. B.; SILVA, B. A. SILVA, B. C. **Análise das Estimativas da Precipitação Diária do Produto GPM-IMERG na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Região Sudeste do Brasil.** *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ - ISSN 0101-9759 e- ISSN 1982-3908 - Vol. 43 - 2, p. 449-459, 2020.*

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Special report: special report on climate change and land.** Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/srcl/chapter/chapter-2/>> Acesso em 18 de setembro de 2020.

TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. O. **Introdução à Climatologia.** Ubá: Ed. Geographica, 2008. – Série Textos Básicos de Geografia. 234p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia ciência e aplicação**. Capítulos 4 e 5, 1ª ed. Porto Alegre ABHR, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre. Editora da UFRGS/ABRH, 2004.

TUCCI, C.E. M. **Inundações urbanas**. ABRH/RHAMA, 2007.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão digital 2 – Recife, 2006.  
Disponível em:  
[https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA\\_E\\_CLIMATOLOGIA\\_VD2\\_Mar\\_2006.pdf](https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf)

VASQUES, A. C. **Características de precipitação sobre a América do Sul provenientes de diferentes fontes de dados com ênfase no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.

VON SPERLING. M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 452 p.– 3 Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WAGNER, P. D.; FIENER, P.; WILKEN, F.; KUMAR, S.; SCHNEIDER, K. **Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions**. J. Hydrol., v. 464-465, n. 1, p. 388-400, 2012.

**Apêndice A – Análise de impactos sociambientais dos eventos extremos ocorridos na  
bacia com análise dos sistemas meteorológicos deflagradores.**

Eventos extremos de precipitação ocorridos na bacia do rio Piracicaba/MG.

<b>Data do evento</b>	<b>Município</b>	<b>Evento extremo</b>	<b>Formulário do S2id</b>	<b>Sistemas meteorológicos atuantes</b>
19/12/2011	Alvinópolis/MG	Enxurradas e Chuvas fortes	AVADAN	Formação e atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).
29/01/2015	Antônio Dias/MG	Seca	FIDE	Bloqueio Atmosférico e nenhum episódio de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)
20/01/2003	Coronel Fabriciano /MG	Chuva Torrencial	AVADAN	Formação e atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).
27/01/2009	Rio Piracicaba/MG	Enchentes e inundações graduais	AVADAN	Formação e atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).
24/01/2013	Itabira/MG	Chuvas fortes e deslizamento de terra	FIDE	Formação e atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Segue-se a descrição e análise dos eventos de acordo com os sistemas meteorológicos atuantes, utilizando como base os boletins Agroclimatológico mensal do INMET e os Boletins Climanalise do CPTEC/INPE. Em cada caso, o boletim utilizado é especificado.

**Data:** 19/12/2011

**Município:** Alvinópolis

**Evento Extremo:** Enxurradas e Chuvas fortes

**Descrição do Evento:** Enxurradas constantes e chuvas fortes do dia 18 ao dia 22/12, causando deslizamento das encostas, desabamento de algumas residências localizadas nas áreas urbanas (Casarões que compõem o Patrimônio Histórico Municipal), queda de muros de arrimo nas vias públicas. Na zona rural atingiu as obras de arte, estradas vicinais que dão acesso a APA Carvão de Pedra.

**Boletim utilizado como referência:** Agroclimatológico mensal INMET Dezembro/2011

**Sistemas Meteorológicos atuantes:** Os elevados totais mensais de chuva registrados no mês de dezembro de 2011 foram justificados pela formação e atuação da ZCAS. O estabelecimento deste sistema implica na formação de uma extensa banda de nebulosidade desde a região Amazônica passando pelo Brasil Central e prosseguindo pela região sudeste. Para que este sistema seja formado é necessário que uma frente fria atue sobre a região sudeste por pelo menos quatro dias, permanecendo assim em uma posição semi-estacionária e que, em altos níveis da atmosfera estejam configuradas a circulação da Alta da Bolívia (AB) e de um Vórtice ou Cavado (VCAN ou CAN). Ambas as configurações foram observadas em quatro episódios neste mês. Nos cinco primeiros dias do mês observou-se a atuação da primeira ZCAS. O segundo episódio de ZCAS atuou sobre a região entre os dias 9 e 12. Entre os dias 16 e 20 observou-se a atuação da terceira ZCAS. Já entre os dias 27 a 31 observou-se o quarto evento de ZCAS. Portanto, a alta frequência de ZCAS foi observada durante todos os decêndios do mês.

A seguir apresentam-se as imagens do satélite GOES-13 disponível no acervo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais para o dia deste evento nos canais infravermelho, vapor d'água, visível e t-realce. Na imagem do infravermelho, quanto mais brancas as nuvens, mais frias elas são, o que indica a presença de nuvens mais altas. Pode-se observar também na imagem do infravermelho, nuvens cinzas com tons claros em Minas Gerais. Na imagem do visível é indicado o quanto de radiação solar está sendo refletido pela nuvem. Quanto mais espessa a nuvem, ela vai refletir mais e vai estar mais clara. Pode-se observar que no dia 19/12/2011 há presença de bastante nebulosidade em Minas Gerais. Já o canal do vapor d'água indica a umidade e também serve para monitorar os movimentos horizontais e verticais do vento. Pode-se observar a presença de umidade no dia estudado e também a atuação da ZCAS. Finalmente, na imagem do canal T-Realce, que representa o topo das nuvens, pode-se observar uma cor alaranjada, indicando temperaturas na faixa de 40° a 30° C em Minas Gerais, que representa a presença de nuvens baixas.

Imagens satélite Goes - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)  
Imagem no canal do Infravermelho – Data: 19/12/2011 – Horário: 15h00min

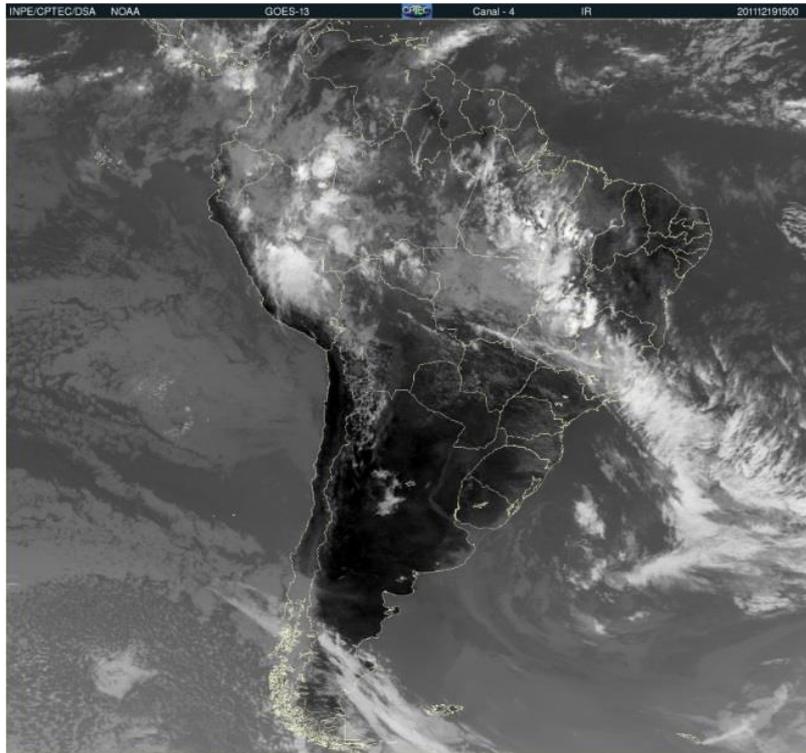


Imagem no canal do Vapor d'água – Data: 19/12/2011 – Horário: 15h00min

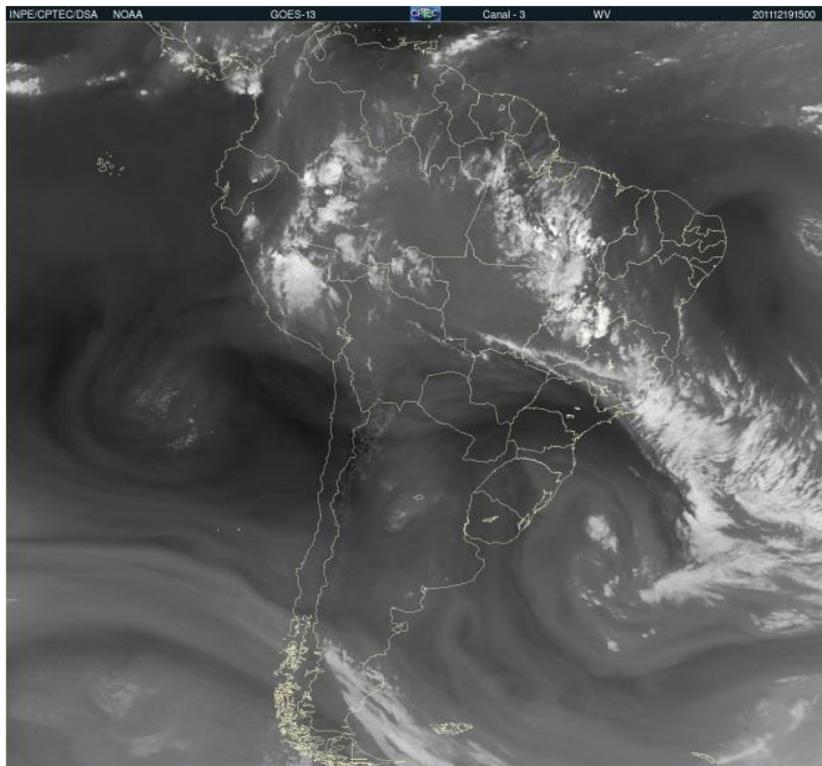


Imagem no canal do Visível – Data: 19/12/2011 – Horário: 15h00min

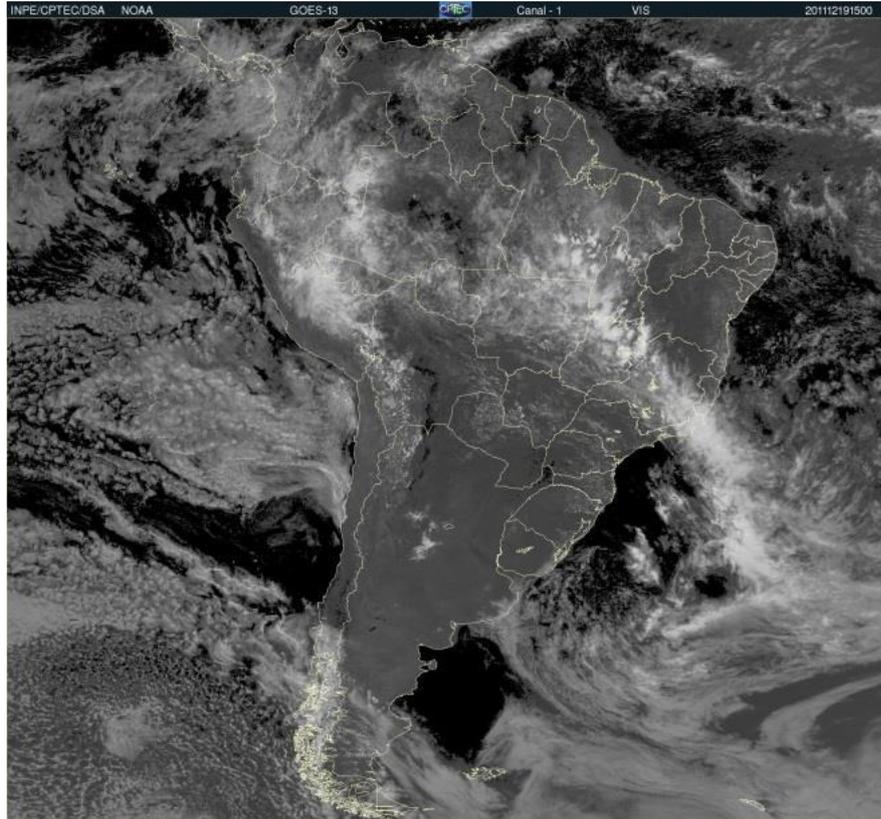
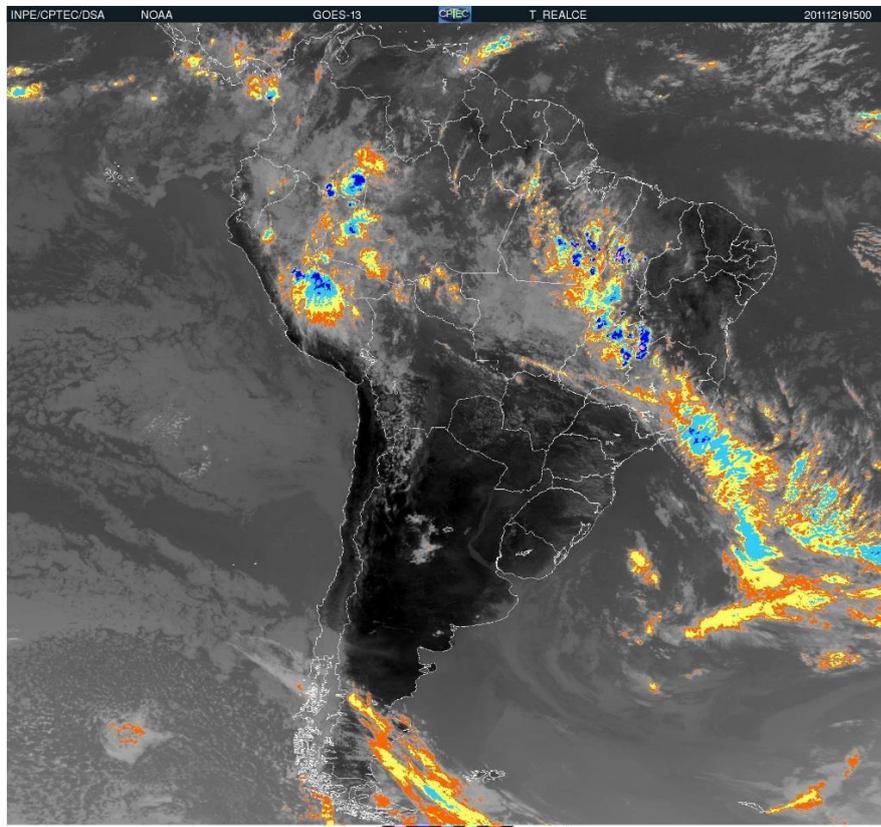


Imagem canal T-Realce – Data: 19/12/2011 – Horário: 15h00min



**Data:** 29/01/2015

**Município:** Antônio Dias

**Evento Extremo:** Seca

**Boletim utilizado como referência:** Agroclimatológico mensal INMET Janeiro/2015

**Sistemas Meteorológicos atuantes:** No mês de janeiro de 2015 as precipitações ficaram abaixo da climatologia em toda a região. Os maiores desvios negativos foram registrados no triângulo e sul de Minas Gerais. O estabelecimento de um forte Bloqueio Atmosférico no período de 8 a 19 de janeiro foi o responsável pela escassez ou baixos volumes de chuva generalizados na região. Esse sistema inibiu o avanço dos sistemas de origem frontal da região sul para a região sudeste e, com isso, nenhum episódio de ZCAS foi configurado. Vale ressaltar que, a ZCAS é um dos principais sistemas meteorológicos responsáveis pelos mais elevados volumes de chuva no verão (estação chuvosa na região). Com a irregularidade, tanto espacial quanto temporal das chuvas, as temperaturas na região também sofreram alterações. Em termos médios, a temperatura média compensada, assim como as médias das temperaturas máximas e mínimas, ficaram acima da média climatológica.

**Data:** 20/01/2003

**Município:** Coronel Fabriciano

**Evento Extremo:** Chuva Torrencial

**Descrição do Evento:** Chuva torrencial com transbordamento do Ribeirão Caladão e enchente do rio Piracicaba. Rompimento no fornecimento de água, coleta de lixo, transporte público e particular, rompimento de rede de esgoto, desmoronamento total e parcial de casas. No total foram 101 pessoas deslocadas, 1 pessoa levemente ferida e 659 afetadas além de prejuízos econômicos.

**Boletim utilizado como referência:** Climanálise Boletim de Monitoramento e Análise Climática – Janeiro/2003

**Sistemas Meteorológicos atuantes:** O mês de janeiro de 2003 foi caracterizado pelo excesso chuvas nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Estas chuvas foram ocasionadas pela atuação da ZCAS que permaneceu semi-estacionária, causando inúmeros transtornos. Sobre os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, em particular, ocorreram totais de chuva entre 250 mm e 500 mm.

**Data:** 27/01/2009

**Município:** Rio Piracicaba

**Evento Extremo:** Enchentes e inundações graduais

**Descrição do Evento:** Intensas precipitações pluviométricas ocorreram ocasionando a elevação do rio Piracicaba em aproximadamente 07 metros acima do nível normal que provocou inundações nas áreas urbanas e rural do município. No total foram 700 pessoas desalojadas, 15 desabrigadas, 1152 afetadas, além de danos materiais em edificações, e prejuízos econômicos onde a inundação causou danos em 30 estabelecimentos comerciais, bares, restaurantes e armazéns que tiveram seus produtos perdidos.

**Boletim utilizado como referência:** Agroclimatológico mensal INMET Janeiro/2009.

**Eventos Meteorológicos:** No mês de janeiro de 2009 ocorreu precipitação acima da média no Espírito Santo, Triângulo Mineiro, leste, nordeste e norte de Minas Gerais, Rio de Janeiro, oeste, centro-sul e leste de São Paulo e nas demais áreas ocorreu precipitação próxima da média. O alinhamento de áreas de instabilidade tropicais com um sistema frontal sobre o Oceano Atlântico causaram chuvas fortes entre os dias 4 e 7 no Rio de Janeiro, Espírito Santo, Zona da Mata, leste, nordeste e norte de Minas Gerais. Além dos sistemas frontais, áreas de instabilidade tropical causaram pancadas de chuvas intensas em áreas isoladas, acompanhadas de trovoadas e em alguns casos rajadas de ventos fortes. Adicionalmente, no terceiro decêndio do mês, a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), caracterizada por uma banda de nebulosidade persistente, causou grande quantidade de chuvas e transtornos em várias cidades de Minas Gerais e Espírito Santo. Mais de 100 municípios decretaram estado de emergência em Minas Gerais, devido a problemas ocasionados pelas chuvas fortes.

**Data:** 24/01/2013

**Município:** Itabira

**Evento Extremo:** Chuvas fortes e deslizamento de terra

**Descrição do Evento:** Devido ao alto índice de precipitação e a um corte do terreno causando sua instabilização com ausência de obras de contenção, houve uma saturação do solo provocando deslizamento e soterramento de um proprietário de um restaurante situado na periferia da cidade, levando ao óbito.

**Boletim:** Agroclimatológico mensal INMET Janeiro/2013.

**Eventos Meteorológicos:** Em janeiro de 2013, a precipitação variou de normal a acima do normal climatológica no Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e no norte de São Paulo.

Nas demais áreas da região, a precipitação variou de normal a abaixo da normal climatológica. A primeira frente fria se deslocou pelo litoral da região sudeste no dia 02. Essa frente fria foi a responsável pelo grande volume de chuva acumulado nos dias 03 e 04 no Rio de Janeiro. A segunda frente fria se deslocou pelo litoral da região sudeste no dia 09, e seu posicionamento favoreceu a formação do primeiro episódio de ZCAS no mês, e que atuou até o dia 18. A terceira frente fria chegou ao litoral da região sudeste no dia 26 e favoreceu a formação do segundo episódio de ZCAS em janeiro, que atuou até o dia 31. Nesse período, as chuvas foram mais intensas em Minas Gerais.

A seguir apresentam-se as imagens do satélite GOES-13 disponível no acervo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais para o dia deste evento nos canais infravermelho, vapor d'água, visível e t-realce. Na imagem do infravermelho do dia 24/01/2013, bem como na imagem do visível, pode-se observar que há bastante nebulosidade no Estado de Minas Gerais. Pode-se confirmar isso na imagem do vapor d'água. Já na imagem no canal T-Realce, que representa a temperatura do topo das nuvens, pode-se observar a cor amarela e azul no norte de Minas Gerais, indicando temperaturas na faixa entre 50 ° e 40 °C, que é o indicativo de nuvens médias a altas, onde as médias podem ser as nuvens altocumulus, altostratus e nimbostratus e as nuvens altas podem ser cirrus, cirrocumulus e cirrostratus.

Imagem no canal Infravermelho – Data: 24/01/2013– Horário: 21h00min

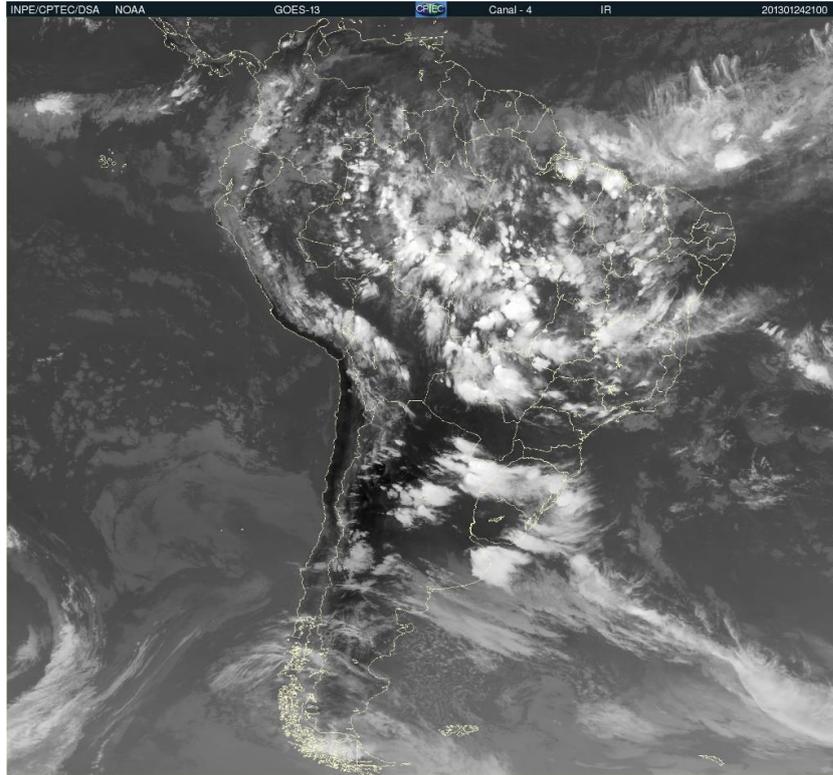


Imagem no canal do Vapor d'água – Data: 24/01/2013 – Horário: 21h00min

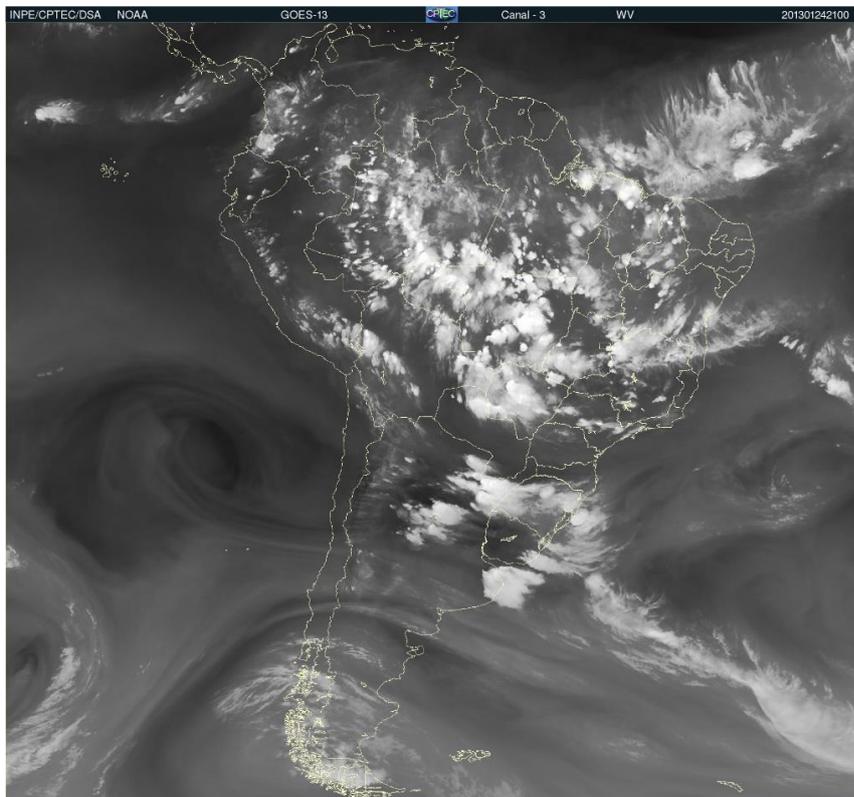


Imagem no canal Visível – Data: 24/01/2013 – Horário: 21h00min

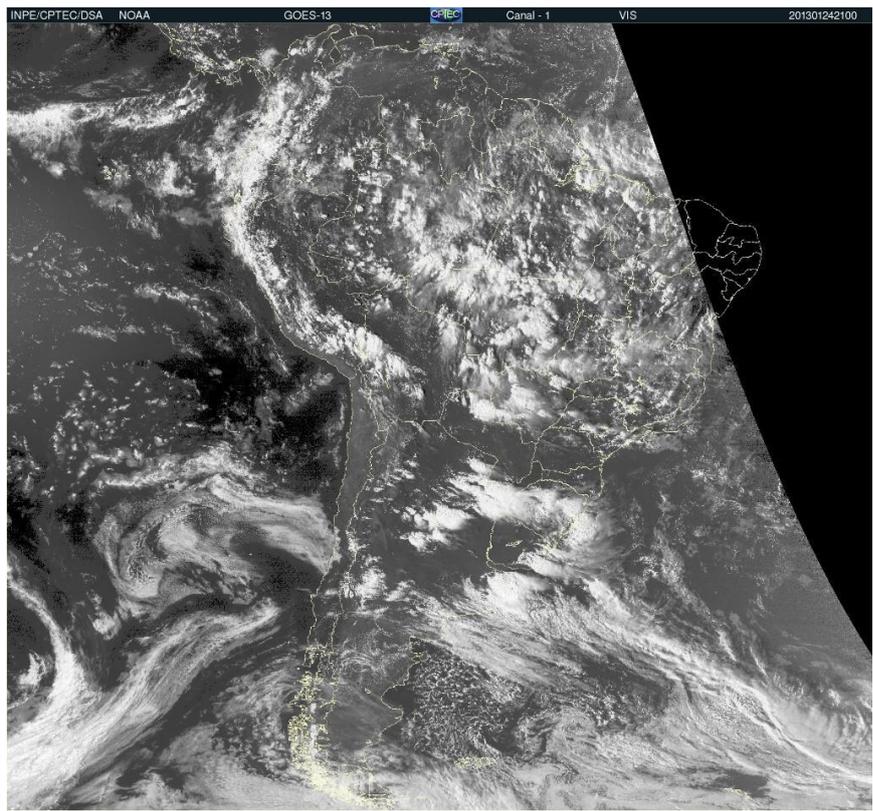


Imagem canal T-Realce – Data: 24/01/2013 – Horário: 21h00min

