



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CICATRIZES DE UMA TRAGÉDIA: A PERSPECTIVA GEOLÓGICA E  
GEOMORFOLÓGICA DA DEFLAGRAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA NO  
VALE DO TAQUARI (RS) DURANTE O EVENTO CLIMÁTICO EXTREMO DE 2024.**

**OLÍVIA MARIA SOUZA SANTOS**

**RIO DE JANEIRO  
2025**



Olívia Maria Souza Santos

**CICATRIZES DE UMA TRAGÉDIA: A PERSPECTIVA GEOLÓGICA E  
GEOMORFOLÓGICA DA DEFLAGRAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA NO  
VALE DO TAQUARI (RS) DURANTE O EVENTO CLIMÁTICO EXTREMO DE 2024.**

Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), apresentado como requisito necessário para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco M. W. Tognoli (UFRJ)  
Coorientador: Dr. Alessandro F. Palmeira (UFRJ)

Rio de Janeiro  
2025

## CIP - Catalogação na Publicação

S236c Santos, Olívia Maria Souza  
Cicatrizes de uma tragédia: a perspectiva geológica e geomorfológica da deflagração dos movimentos de massa no Vale do Taquari (RS) durante o Evento Climático Extremo de 2024. / Olívia Maria Souza Santos. -- Rio de Janeiro, 2025.  
142 f.

Orientador: Francisco Manoel Wohnrath Tognoli.  
Coorientador: Alessandro Ferraz Palmeira .  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Bacharel em Geologia, 2025.

1. Vale do Taquari (RS). 2. Evento Climático Extremo. 3. Movimentos de Massa. 4. Inundações. I. Tognoli, Francisco Manoel Wohnrath, orient. II. Palmeira , Alessandro Ferraz, coorient. III. Título.

Olívia Maria Souza Santos

**CICATRIZES DE UMA TRAGÉDIA: A PERSPECTIVA  
GEOLÓGICA E GEOMORFOLÓGICA DA DEFLAGRAÇÃO DOS  
MOVIMENTOS DE MASSA NO VALE DO TAQUARI (RS)  
DURANTE O EVENTO CLIMÁTICO EXTREMO DE 2024.**

Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ),  
apresentado como requisito necessário para a obtenção  
do título de conclusão de Bacharelado em Geologia.

Aprovada em: 22/07/2025

Por:

---

Orientador: Prof. Dr. Francisco Manoel Wohnrath Tognoli (UFRJ)

---

Coorientador: Dr. Alessandro Ferraz Palmeira (UFRJ)

---

Prof. Dr. José Carlos Sícoli Seoane (UFRJ)

---

Prof. Dr. Adilson Viana Soares Júnior (Unifesp)

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho representa não apenas o encerramento de uma etapa acadêmica, mas também o resultado de uma trajetória construída com o apoio de diversas pessoas e instituições.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e ao curso de Geologia, deixo minha profunda gratidão pela formação sólida, pelos desafios que impulsionaram o meu crescimento e pelas oportunidades que moldaram o meu percurso científico e pessoal.

Ao Prof. Dr. Francisco Tognoli, meu orientador, sou imensamente grata pela escuta atenta, pelo apoio constante e pela inspiração que me guiou em todas as etapas da pesquisa. Ao Dr. Alessandro Palmeira, meu coorientador, agradeço pelas contribuições técnicas, pelas discussões instigantes e pela partilha do seu conhecimento.

Ao Prof. Dr. Cláudio Limeira, meu orientador acadêmico, deixo meu sincero reconhecimento pela sua generosidade, paciência e disponibilidade durante toda a graduação. Foi seu suporte que tornou possível transpor muitos dos obstáculos durante minha trajetória, me trazendo a confiança de que a Geologia era o caminho certo.

À minha família, que é o alicerce de tudo o que sou e construo, deixo a mais sincera gratidão pelo apoio e pela força que sempre me transmitiram. Em especial, aos meus pais Sônia Souza e Sílvio Santos, que tornaram possível o sonho da faculdade e acompanharam de perto cada passo desta caminhada. Essa conquista é, sem dúvida, também de vocês.

Ao meu namorado Pablo Aguiar, por estar comigo nos dias bons e nos ruins, nos momentos tranquilos e nas tempestades. Obrigada por me apoiar e por me ajudar a ser sempre uma pessoa melhor. É maravilhoso poder dividir a vida com você.

Agradeço também aos colegas e amigos da graduação, especialmente àqueles que partilharam comigo os dias de campo, cuja companhia e parceria foram fundamentais ao longo desta jornada, com destaque para Marcelle Tostes e Angela Maria. Registro ainda minha gratidão a Davi Cardoso, Frederico Miranda, Leonardo Vieira e David Machado, por todo o apoio e convivência durante esse período.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo traçar um panorama analítico que relate os impactos do Evento Climático Extremo (ECE) ocorrido no estado do Rio Grande do Sul em maio de 2024 aos controles geomorfológicos, geológicos e estruturais que influenciaram a deflagração de movimentos de massa no contexto geográfico do Vale do Taquari. A relevância do estudo fundamenta-se na necessidade de aprofundar a compreensão sobre as cheias severas que afetam recorrente e significativamente essa região, especialmente diante do aumento da frequência e intensidade dos eventos hidrológicos extremos.

A área de estudo localiza-se na porção nordeste do estado e é composta por 36 municípios, sendo atravessada pelo Rio Taquari, cuja dinâmica fluvial desempenha papel central no impacto causado. As inundações do rio, frequentemente agravadas por alterações no uso e ocupação da terra, evidenciam a importância de considerar os condicionantes naturais e antrópicos na análise da vulnerabilidade local.

O objetivo central da pesquisa é construir uma análise integrada da ocorrência dos movimentos de massa deflagrados em meio a tragédia de 2024, com foco na influência dos fatores geomorfológicos, geológicos e estruturais que condicionaram sua distribuição e intensidade. Adicionalmente, busca-se evidenciar o papel das geociências na formulação de estratégias de mitigação e adaptação aos riscos naturais intensificados pelas mudanças climáticas. Os objetivos específicos incluem a análise da distribuição geoespacial dos movimentos de massa registrados em 2024, a integração de diferentes camadas temáticas espaciais baseadas na geomorfometria e nos aspectos estruturais, e a avaliação das tendências climáticas recentes, associada à recorrência de eventos extremos anteriores.

A metodologia adotada foi estruturada em três etapas complementares. Inicialmente, realizou-se a caracterização geomorfométrica e estrutural da área de estudo a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão SRTM, com resolução espacial de 30 metros, a qual possibilitou a classificação das feições do relevo por *geomorphons*, a produção do mapa de declividade e extração automática de lineamentos. Em seguida, foram conduzidas análises qualitativas e quantitativas generalizadas para toda a área, incorporando atributos como inclinação do terreno, densidade de fraturas e compartimentação geomorfológica. Na etapa em sequência,

as análises foram aprofundadas em três sub-regiões previamente selecionadas com base no mapa de densidade *kernel*, que indicou áreas com alta concentração de movimentos de massa. Nessas subáreas, foram realizadas correlações entre os atributos geológicos e geomorfológicos com a geometria e extensão dos movimentos identificados, conforme mapeamento realizado pelas equipes técnicas do CEMADEN/MCTI, em parceria com a UNESP.

Por fim, realizou-se a análise das tendências climáticas recentes com base nos dados dos produtos CHIRPS (precipitação) e MODIS (temperatura e evapotranspiração), o que possibilitou a elaboração do climograma e gráfico de balanço hídrico para o período de 2000 a 2024. Além disso, foram conduzidas análises mais detalhadas para os anos de 2020, 2023 e 2024, os quais foram marcados por Eventos Climáticos Extremos (ECE's) nos meses de junho, setembro e maio, respectivamente.

Os resultados indicam que os movimentos de massa estão fortemente associados a áreas com declividades superiores a 15%, compartimentadas em unidades como encostas, cristas e vales, e condicionadas localmente por padrões de fraturamento com orientações predominantes NE-SW e NW-SE, característico do contexto estrutural da Bacia do Paraná. Observou-se ainda uma correspondência significativa entre a densidade de fraturas, a rede de drenagem e as áreas mais afetadas. Em relação ao clima, a análise de séries temporais entre 2000 e 2024 aponta para uma frequência crescente de eventos extremos na região, os quais contribuem diretamente para o aumento do grau de exposição a desastres hidrológicos cada vez mais severos.

Conclui-se que a conjugação entre atributos geomorfológicos, estruturais e padrões climáticos recentes exerce influência direta sobre a dinâmica dos movimentos de massa no Vale do Taquari. A tragédia de 2024 não representa um episódio isolado, mas sim um marco dentro de uma sequência histórica recorrente de eventos hidrológicos de diversas magnitudes, que refletem a vulnerabilidade da região à ocorrência de desastres. Assim, a investigação das variáveis condicionantes por meio de geotecnologias contribui para o reconhecimento de áreas mais suscetíveis e pode orientar estratégias de planejamento e prevenção de riscos em contextos com características semelhantes.

## ABSTRACT

This study aims to develop an analytical overview that relates the impacts of the Extreme Weather Event (EWE), which occurred in the state of Rio Grande do Sul in May 2024, to the geomorphological, geological, and structural controls that influenced the triggering of mass movements within the geographical context of the Taquari Valley. The relevance of this research lies in the growing need to deepen the understanding of severe floods that recurrently affect this region, particularly given the rising frequency and intensity of extreme hydrological events.

The study area is located in the northeastern portion of the state and comprises 36 municipalities. It is transected by the Taquari River, whose fluvial dynamics play a central role in shaping regional impacts. These floods, often worsened by changes in land use and occupation, underscore the importance of considering both natural and anthropogenic factors when assessing local vulnerability.

The central objective of the research is to construct an integrated analysis of the mass movements triggered during the 2024 event, focusing on the influence of geomorphological, geological, and structural factors on their spatial distribution and intensity. Additionally, the study highlights the role of geosciences in supporting mitigation and adaptation strategies for natural hazards intensified by climate change. Specific objectives include the geospatial analysis of mass movements recorded in 2024, the integration of multiple thematic spatial layers based on geomorphometric and structural parameters, and the evaluation of recent climatic trends associated with the recurrence of previous extreme events.

The methodology was structured into three complementary stages. First, a geomorphometric and structural characterization of the study area was carried out using the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Model (DEM), with a spatial resolution of 30 meters. This allowed for the classification of landforms using geomorphons, the generation of a slope map, and the automatic extraction of structural lineaments. Next, qualitative and quantitative analyses were conducted across the study area, incorporating variables such as slope gradients, fracture density, and geomorphological segmentation. Subsequently, these analyses were refined in three subregions previously selected through a kernel density map, which identified zones with a high concentration of mass movement events. In these

subareas, correlations were drawn between geological and geomorphological attributes and the geometry and extent of the mapped movements, based on work conducted by technical teams from CEMADEN/MCTI in collaboration with UNESP.

Finally, recent climatic trends were analyzed using data from CHIRPS (precipitation) and MODIS (temperature and evapotranspiration), which supported the creation of climograms and water balance graphs covering the period from 2000 to 2024. Detailed assessments were also carried out for the years 2020, 2023, and 2024, each marked by EWE's occurring in June, September, and May, respectively.

The results show that mass movements are closely associated with areas of slope greater than 15%, divided into units such as hillslopes, ridges, and valleys, and locally controlled by fracture patterns predominantly oriented NE-SW and NW-SE, features typical of the Paraná Basin's structural framework. A strong correlation was also observed between fracture density, drainage network patterns, and the most severely affected zones. Regarding climatic behavior, the time-series analysis between 2020 and 2024 indicates a growing frequency of extreme events in the region, which significantly contributes to heightened exposure to severe hydrological hazards.

In conclusion, the interaction between geomorphological and structural characteristics and recent climatic trends directly influences the dynamics of mass movements in the Taquari Valley. The 2024 disaster should not be seen as an isolated occurrence but rather as part of a recurring historical sequence of hydrological events of varying magnitudes, reflecting the region's inherent vulnerability. The investigation of conditioning variables through geotechnologies thus supports the identification of the most susceptible areas and can inform risk prevention and spatial planning strategies in similarly vulnerable contexts.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 01:** Localização da área de estudo dentro do contexto do território nacional e da Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas.

**Figura 02:** Localização do Vale do Taquari, contido na Bacia do Rio Taquari-Antas.

**Figura 03:** Zoneamento climático no Vale do Taquari segundo a classificação de Köppen.

**Figura 04:** Precipitação média anual no Rio Grande do Sul.

**Figura 05:** Isoetas de precipitação média anual (mm de chuva) para o Vale do Taquari.

**Figura 06:** Mapa das Unidades Geomorfológicas e Hipsometria para o estado do Rio Grande do Sul.

**Figura 07:** Mapa geomorfológico do banco de dados do IBGE (2023) e hipsométrico (SRTM).

**Figura 08:** Tipos de Modelados e Formas do Relevo da bacia do rio Taquari-Antas

**Figura 09:** Contexto hidrológico do Vale do Taquari.

**Figura 10:** Influência da cobertura vegetal sob a estabilidade das encostas.

**Figura 11:** Distribuição quantitativa das classes de solo para a região do Vale do Taquari.

**Figura 12:** Mapa de solos mapa de suscetibilidade dos solos a erosão hídrica.

**Figura 13:** Comparação de uso e ocupação da terra (1985 e 2023) no Vale do Taquari.

**Figura 14:** Gráfico da evolução da expansão urbana no Vale do Taquari (1985 a 2023).

**Figura 15:** Diagrama de Sankey de transições para área urbanizada no Vale do Taquari (1985 a 2023).

**Figura 16:** Contextualização das Províncias estruturais brasileiras no Rio Grande do Sul.

**Figura 17:** Mapa geológico simplificado da compartimentação tectônica do ESRG.

**Figura 18:** Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná com destaque para as supersequências.

**Figura 19:** Geologia da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

**Figura 20:** Contexto Geológico do Vale do Taquari.

**Figura 21:** Diagrama estratigráfico da Bacia do Paraná modificado para o Vale do Taquari.

**Figura 22:** Compilado de imagens da tragédia de julho de 2020, para os municípios de Encantado, Arroio do Meio e Muçum.

**Figura 23:** Imagens de satélite para o território nacional referente aos dias 04/09/2023 e 27/09/2023.

**Figura 24:** Mosaico de registros fotográficos de municípios pertencentes ao Vale do Taquari em meio ao ECE de 2024.

**Figura 25:** Contextualização dos fenômenos associados ao evento climático extremo de 2024 no Rio Grande do Sul.

**Figura 26:** Mosaico de imagens apresentando municípios pertencentes ao Vale do Taquari

em meio ao ECE 2024.

**Figura 27:** Representação gráfica das emissões de GEE e o comportamento da concentração anual dos três principais gases representantes (1850 a 2019).

**Figura 29:** Panorama do contexto dos movimentos de massa segundo a nota técnica SEI/MCTI.

**Figura 30:** Mosaico de fotografias referentes a movimentos de massa ocorridos no Vale do Taquari em meio ao ECE 2024.

**Figura 31:** Representação do fluxo metodológico.

**Figura 32:** Tipos de Geomorphons, associando o conceito de o conceito de Local Ternary Patterns (LTP).

**Figura 33:** Adaptação dos geomorphons à escala do terreno local.

**Figura 34:** Processo de elaboração de um mapa de declividade no QGIS.

**Figura 35:** Etapas para a elaboração do Mapa de *Kernel*.

**Figura 36:** Pontos de ruptura, indicando a ocorrência dos movimentos de massa.

**Figura 37:** Mapa de classificação geomorfológica da área de estudo, gerado a partir do algoritmo *r.geomorphon*.

**Figura 38:** Representação 3d do terreno com a classificação geomorfológica e análises quantitativas de cobertura.

**Figura 39:** Mapa de declividade e risco potencial.

**Figura 40:** Trama estrutural do Vale do Taquari.

**Figura 41:** Diagrama de roseta representando a frequência e orientação dos lineamentos estruturais no Vale do Taquari.

**Figura 42:** Mapa de densidade linear de fraturas, acompanhado das distribuição dos pontos de ruptura e feições relativas aos lineamentos.

**Figura 43:** Mapa de calor da densidade de movimentos de massa no Vale do Taquari.

**Figura 44:** Visualização das sub-regiões selecionadas para análise detalhada.

**Figura 45:** Contexto de distribuição dos movimentos de massa, dispondo a geometria destes em meio as sub-regiões II, III e IV.

**Figura 46:** Caracterização geomorfométrica e movimentos de massa na Área II.

**Figura 47:** Distribuição das classes a partir da perspectiva de declividade e risco potencial para sub-região II.

**Figura 48:** Distribuição dos geomorphons e geometrias dos movimentos de massa na Área III.

**Figura 49:** Distribuição das classes a partir da perspectiva de declividade e risco potencial para a Área III.

**Figura 50:** Distribuição dos geomorphons e movimentos de massa na Área IV.

**Figura 51:** Distribuição dos geomorphons e movimentos de massa na Área IV.

**Figura 52:** Distribuição dos pontos de ruptura e lineamentos estruturais para as sub-regiões.

**Figura 53:** Climograma relativo aos anos de 2000 a 2024, apresentando a variação interanual de precipitação e temperatura.

**Figura 54:** Climogramas referentes aos anos de 2020, 2023 e 2024 para o Vale do Taquari.

**Figura 55:** Balanço hídrico mensal no Vale do Taquari (2000–2024).

**Figura 56:** Relação entre pontos de ruptura e declividade.

**Figura 57:** Representação gráfica do histórico de decretos de emergência e calamidade no estado do RS, entre 1980 e 2020.

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 01:** Precipitação acumulada em setembro de 2023 no Rio Grande do Sul para 6 municípios críticos.

**Tabela 02:** Impactos infraestruturais e demográficos de municípios no Vale do Taquari em decorrência da tragédia de 2024.

**Tabela 03:** Relação entre os valores das variáveis escolhidas para a produção do mapa geomorfométrico pelo algoritmo *r.geomorphon*, com as unidades de pesquisa em metros.

**Tabela 04:** Relação entre declividade e risco potencial de alagamentos e escorregamentos.

**Tabela 05:** Relação entre os parâmetros e seus significados de acordo com a documentação do PCI Geomatics.

**Tabela 06:** Parâmetros utilizados para a elaboração do mapa de *kernel*.

**Tabela 07:** Conjunto de dados utilizados para a análise de tendências climáticas recentes.

**Tabela 08:** Relações entre a área da sub-região com o número de pontos de ruptura e geometrias presentes.

**Tabela 09:** Descrição de dados quantitativos e estatísticos para as sub-regiões.

## GLOSSÁRIO

<b>ANA</b>	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
<b>CHIRPS</b>	<i>Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations</i>
<b>COREDE</b>	Conselho Regional de Desenvolvimento
<b>CRED</b>	<i>Centre for Research on the Epidemiology of Disasters</i>
<b>ECE</b>	Evento Climático Extremo
<b>ECE 2024</b>	Evento Climático Extremo de 2024
<b>EEC</b>	Evento Extremo de Cheias
<b>EMBRAPA</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<b>ESRG</b>	Escudo Rio-Grandense
<b>FEE</b>	Fundação de Economia e Estatística
<b>FIERGS</b>	Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul
<b>GEE</b>	Gases Efeito Estufa
<b>GRASS</b>	<i>Geographic Resources Analysis Support System</i>
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>INMET</b>	Instituto Nacional de Meteorologia
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

<b>IPCC</b>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
<b>MCTI</b>	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
<b>MDE</b>	Modelo Digital de Elevação
<b>MODIS</b>	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
<b>MMA</b>	Ministério do Meio Ambiente
<b>NOAA</b>	<i>National Oceanic And Atmospheric Administration</i>
<b>PNMC</b>	Plano Nacional sobre Mudança do Clima
<b>SACE</b>	Sistema de Alerta de Cheias
<b>SGB/CPRM</b>	Serviço Geológico do Brasil
<b>SECOM</b>	Secretaria de Comunicação do Estado do Rio Grande do Sul
<b>SEMA</b>	Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Infraestrutura
<b>SPGG</b>	Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão
<b>SRTM</b>	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
<b>UG</b>	Unidade Geomorfológica
<b>USGS</b>	<i>United States Geological Survey</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Justificativa.....	3
<b>2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Localização e área de estudo.....	4
2.2 Aspectos Fisiográficos.....	7
2.2.1 Clima.....	7
2.2.2 Pluviosidade.....	9
2.2.3 Geomorfologia.....	11
2.2.4 Vegetação.....	15
2.2.5 Hidrologia.....	19
2.2.6 Pedologia.....	20
2.3 Uso e Ocupação da Terra.....	24
<b>3. GEOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL.....</b>	<b>28</b>
3.1 Geologia Regional.....	28
3.2 Geologia Local.....	34
<b>4. HISTÓRICO E IMPACTO DAS ENCHENTES NO RIO GRANDE DO SUL.....</b>	<b>39</b>
4.1 Histórico das Enchentes.....	39
4.2 Enchentes de 2020.....	39
4.3 Enchentes de 2023.....	41
4.4 Enchentes de 2024.....	44
4.5 Enchentes de 2025.....	51
4.6 Rio Grande do Sul: um cenário de mudanças climáticas e resiliência.....	52
<b>5. MOVIMENTOS DE MASSA NO VALE DO TAQUARI (TRAGÉDIA DE 2024).....</b>	<b>55</b>
<b>6. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>59</b>
6.1 Caracterização geoespacial.....	60
6.1.1 Geomorfometria: classificação de geomorphons e avaliação da declividade.....	61
6.1.2 Extração automática de lineamentos e produto fotointerpretado.....	67
6.1.3 Análise da distribuição espacial dos movimentos de massa.....	70
6.2 Cruzamento de dados e correlações.....	72
6.3 Panorama de tendências climáticas recentes.....	73

6.4 Limitações do Método.....	74
<b>7. RESULTADOS.....</b>	<b>76</b>
7.1 Caracterização geoespacial.....	76
7.1.2 Análise de lineamentos e produto fotointerpretado.....	82
7.1.3 Análise da distribuição espacial dos movimentos de massa.....	86
7.2 Análise e relação de dados.....	89
7.2.1 Padrões geomorfológicos e declividade do terreno.....	93
7.2.2 Trama estrutural e deflagração dos processos.....	99
7.3 Tendências climáticas recentes.....	103
<b>8. DISCUSSÕES.....</b>	<b>108</b>
<b>9. CONCLUSÕES.....</b>	<b>114</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas define eventos climáticos extremos como a ocorrência de fenômenos meteorológicos raros em determinada região e época do ano, caracterizados por sua intensidade, duração ou extensão atípicas (Pachauri *et al.*, 2014). Entre esses eventos, destacam-se as inundações severas e movimentos de massa, como os que atingiram o Rio Grande do Sul (RS) em maio de 2024, resultando em significativas perdas humanas, impactos ambientais e prejuízos econômicos (Marengo *et al.*, 2024).

De acordo com a nota da Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul (FIERGS, 2024), o Vale do Taquari foi uma das regiões mais impactadas pelo estado de calamidade decorrente das cheias e chuvas intensas da tragédia, dos quais 26 dos 36 municípios envolvidos chegaram a esse nível crítico. Historicamente, esta região apresenta alta incidência de enchentes, associadas principalmente às chuvas que ocorrem nas cabeceiras das drenagens e escoam rapidamente em direção às áreas a jusante da bacia, o que intensifica as inundações nas porções de vale (Bombassaro & Robaina, 2010).

Segundo Eckhardt *et al.* (2013), a forma entalhada do relevo e a elevada declividade da bacia de captação são os responsáveis pela concentração de grandes vazões de água nas regiões de encosta, resultando no extravasamento para as planícies do vale. Como as principais cidades da região se desenvolveram às margens do Rio Taquari, com uma ocupação progressiva de áreas de risco, uma parcela significativa da população encontra-se exposta aos impactos decorrentes das inundações, como a danificação de infraestruturas, perdas humanas, expressivos prejuízos financeiros e outros problemas socioambientais.

A situação é alarmante para o futuro, pois as projeções climáticas indicam um aumento da precipitação total na região Sul do Brasil, impulsionado também pela crescente ocorrência de eventos extremos (Pinheiro *et al.*, 2013). Nesse contexto, o entendimento dos condicionantes geológicos se soma à necessidade da aplicação das geotecnologias, essenciais para o estudo e análise dos desastres naturais em decorrência das mudanças climáticas, possibilitando o monitoramento, a modelagem e a compreensão dos processos envolvidos em áreas extensas e de maneira ágil.

Este estudo tem como objetivo compreender a influência dos condicionantes geomorfológicos, geológicos e estruturais dos movimentos de massa deflagrados durante Evento Climático Extremo de 2024 (ECE 2024) por meio da utilização de

geotecnologias, permitindo investigar a correlação entre esses processos, bem como suas consequências no meio físico e socioeconômico. Pretende-se também discutir as tendências climáticas recentes, especialmente no que se refere à intensificação dos eventos hidrológicos extremos, contribuindo assim para uma melhor compreensão dos riscos e para o planejamento territorial mais resiliente frente aos impactos das alterações climáticas.

A metodologia adotada integra bases de dados geoespaciais provenientes de repositórios abertos, incluindo técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicadas às dimensões climática, ambiental e social. Em especial, a plataforma *Google Earth Engine* e o software QGIS foram utilizados para a produção de mapas temáticos e análises estatísticas descritivas, destacando tanto os fatores que impulsionaram as cheias quanto seus impactos e prejuízos subsequentes.

Além disso, para a análise dos movimentos de massa tendo em vista o ECE 2024, foi considerada a influência das características geológicas sob perspectiva da trama estrutural presente na região do Vale do Taquari. Assim, o método de análise do software PCI Geomática foi utilizado para gerar a extração automática de lineamentos na área a partir do modelo digital de elevação do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), de resolução espacial de 30 metros. Análises posteriores envolveram técnicas de fotointerpretação para o ajuste manual das principais estruturas observadas, assim como o aprofundamento das investigações quantitativas a partir da aplicação *Jupyter Notebook*. Essa abordagem possibilitou maior exatidão nas subsequentes interpretações acerca da influência da geologia na deflagração dos movimentos de massa no Vale do Taquari em meio a tragédia de maio de 2024.

O documento está estruturado em nove capítulos. O primeiro capítulo corresponde à introdução, apresentando a contextualização do tema, os objetivos e a justificativa do estudo. Do segundo ao quinto capítulo, são discutidos a caracterização da área e o referencial teórico, considerando atributos físicos locais e regionais, bem como a interação entre mudanças climáticas e desastres naturais. Nos capítulos seis a oito, detalha-se a metodologia empregada, os resultados obtidos e as discussões. Por fim, no nono capítulo, são apresentadas as conclusões e considerações finais, incluindo recomendações para pesquisas futuras.

## 1.1 Objetivos

Este estudo tem como principal objetivo traçar um panorama analítico da ocorrência de movimentos de massa associados a eventos hidrológicos extremos no Vale do Taquari, com ênfase nos condicionantes geomorfológicos e geológicos que influenciam na sua deflagração. A investigação concentra-se particularmente na tragédia de maio de 2024, enfatizando a relação entre esses condicionantes e a distribuição espacial dos movimentos. Além disso, busca-se destacar o papel das geociências como ferramenta de apoio à tomada de decisão, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação aos efeitos das mudanças climáticas. Os objetivos específicos incluem:

- I. Analisar a distribuição geoespacial dos movimentos de massa ocorridos em meio à tragédia de 2024;
- II. Integrar diferentes camadas temáticas espaciais, avaliando as interações entre movimentos de massa com condicionantes geomorfológicos, geológicos e estruturais;
- III. Apresentar as tendências climáticas recentes sob a perspectiva dos eventos hidrológicos extremos.

## 1.2 Justificativa

A relevância deste estudo baseia-se na necessidade de aprofundamento das análises das cheias severas na região do Vale do Taquari em decorrência de ECE's. A tragédia de maio de 2024 expressou mais uma vez a intensa vulnerabilidade da região a inundações e movimentos de massa, resultando em perdas humanas, degradação ambiental e prejuízos econômicos significativos. Diante desse contexto, torna-se essencial aprofundar o conhecimento acerca dos fatores que contribuem para a recorrência desses desastres, assim como a influência dos aspectos geomorfológicos e geológicos-estruturais.

Pode-se dizer que o aumento de casos de ECE's no cenário global reforça a necessidade de ampliar os estudos de monitoramento e planejamento territorial, fazendo com que a compreensão dos atributos físicos citados forneçam suporte à decisão para políticas públicas voltadas à redução de impactos e prevenção de desastres. Dessa forma, este trabalho busca apresentar análises de contribuição geomorfológica e geológica que possibilitem incentivar a reflexão acerca do meio social e possíveis medidas para minimizar os impactos de novos eventos hidrológicos extremos no Vale do Taquari.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

### 2.1 Localização e área de estudo

A área selecionada para o desenvolvimento deste trabalho corresponde ao Vale do Taquari, presente na porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul, a cerca de 110 km a noroeste de Porto Alegre. A região é composta por 36 municípios, na qual o Rio Taquari transpassa o vale por uma direção NE-SW. A Figura 01 apresenta a localização do Vale do Taquari em progressão de escala, a partir do banco de dados cartográfico do IBGE, em conjunto com a delimitação proposta pelo COREDE (FEE, 2023).



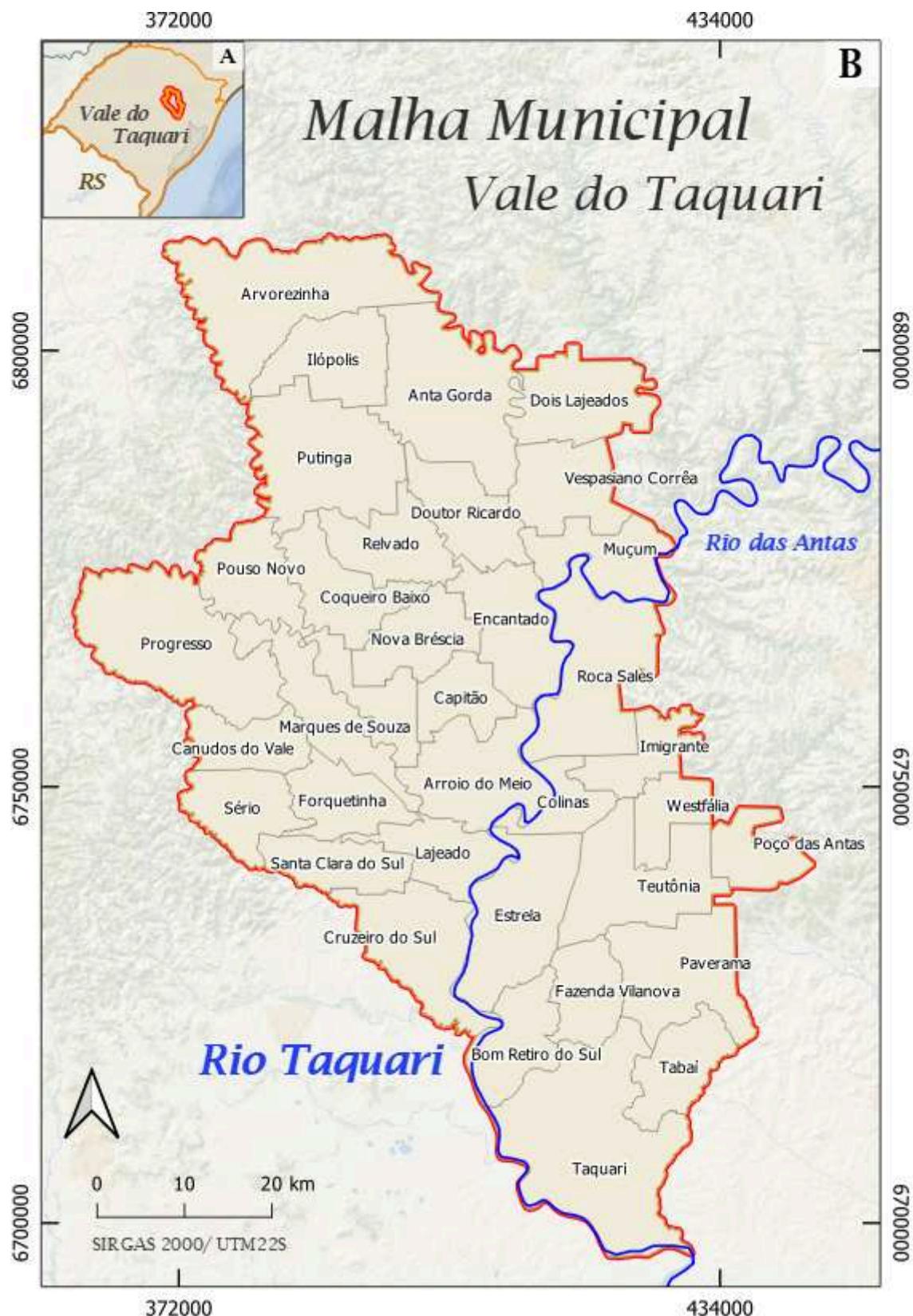
**Figura 01:** Localização da área de estudo a partir da aproximação da escala (de A para B e de B para C) com destaque para o Vale do Taquari (C), com a divisão municipal e o Rio Taquari-Antas. Fonte de dados: IBGE (2021); IBGE (2025); FEE (2023).

Em termos históricos, a ocupação da região do Vale do Taquari tem origem

pré-colonial, com a presença de populações caçadoras e coletores, como as comunidades indígenas Guarani. Posteriormente, seguiram-se ocupações que iam desde grupos de jesuítas e bandeirantes até escravizados africanos e imigrantes de origem alemã e italiana. Dentro desse contexto, as áreas antes ocupadas por povos indígenas foram tomadas e substituídas por fazendas e pequenos lotes de terra, ressignificando o seu uso com a implementação de mudanças na agricultura e na arquitetura (Schneider *et al.*, 2017).

Atualmente, segundo o Conselho Regional de Desenvolvimento do Vale do Taquari, a região possui uma população estimada em 386.201 habitantes para uma área total de 4.825,8 km<sup>2</sup>, resultando em uma densidade demográfica de aproximadamente 80 habitantes por km<sup>2</sup> (FEE, 2023). A dinâmica populacional evidencia crescimento da concentração de áreas urbanas, que aumentaram 18,6% entre 2010 e 2022 de acordo com os resultados divulgados pelo IBGE, enquanto a população rural apresentou uma redução de 14% no mesmo intervalo de tempo. Entre os municípios mais populosos, destacam-se Lajeado (96.651 habitantes), seguido por Teutônia (33.963 habitantes) e Estrela (33.243 habitantes) (Souza, 2024a).

O Vale do Taquari foi escolhido para este estudo por ser caracterizado por suas enchentes recorrentes, um problema que acarreta em impactos críticos à população e à economia local. O Rio Taquari, que atravessa a área, transborda e inunda as regiões circundantes devido à associação entre fatores naturais existentes na bacia hidrográfica com episódios de chuvas intensas, agravadas pelo uso inadequado do solo, como a ocupação progressiva e irregular das margens e a redução das áreas de vegetação natural (Both *et al.*, 2008; Eckhardt *et al.*, 2013). Segundo Kreutz *et al.* (2023), as áreas mais afetadas nesse meio encontram-se entre os municípios de Encantado e Cruzeiro do Sul, na margem direita do Rio Taquari, e entre Roca Sales e Bom Retiro do Sul, na margem esquerda (Figura 02).



**Figura 02:** Localização da área (A) e malha municipal do Vale do Taquari (B), com o rio Taquari-Antas atravessando a região. Fonte de dados: (IBGE, 2025)

## 2.2 Aspectos Fisiográficos

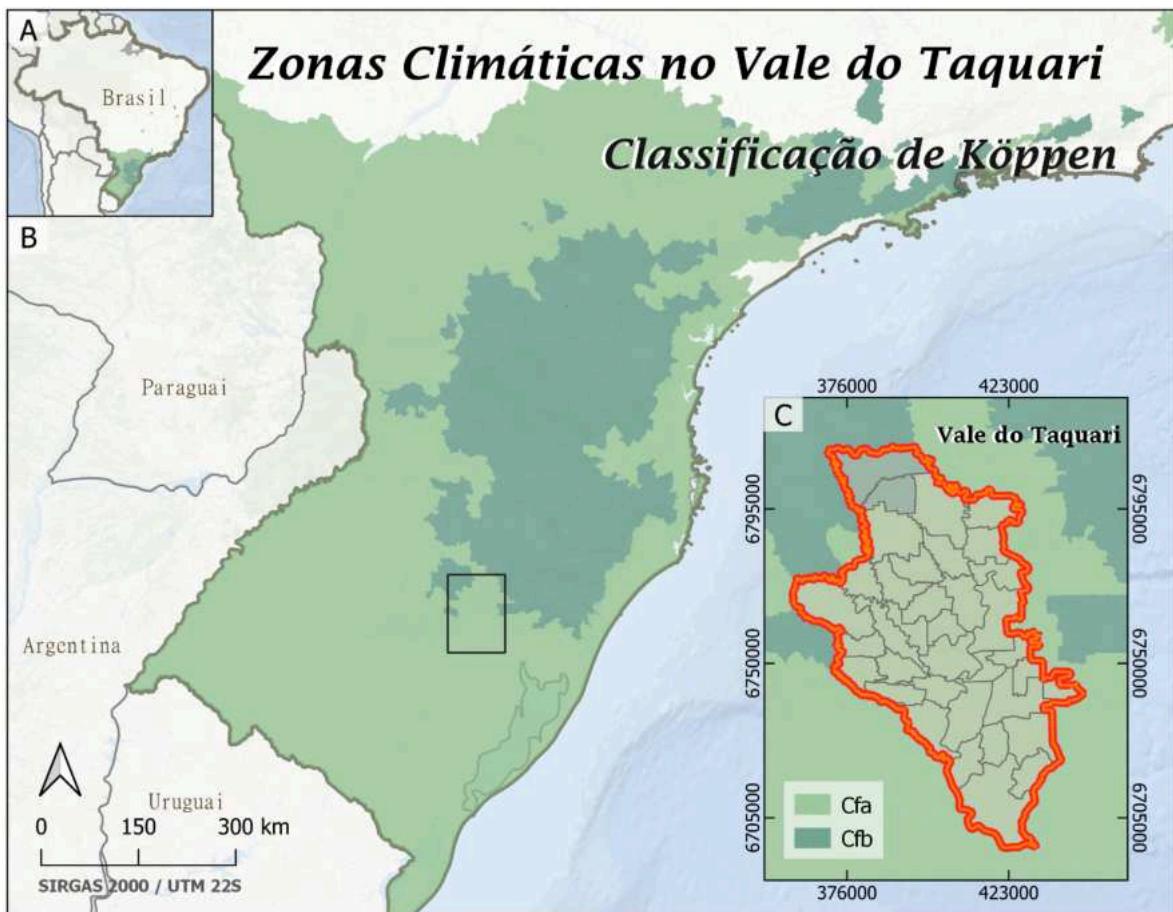
A compreensão da fisiografia de determinado local possibilita a análise do espaço físico por meio da caracterização dos seus fatores condicionantes, tais como clima, pluviosidade, vegetação, geologia, geomorfologia, pedologia e hidrologia. Nessa seção do estudo, busca-se fazer um panorama geral dos aspectos fisiográficos do Vale do Taquari, tendo em vista analisar a dinâmica dos principais constituintes que caracterizam a geografia física local e regional. A apresentação da geologia terá destaque no próximo capítulo.

### 2.2.1 Clima

A análise climática para este trabalho é essencial para compreender os princípios da dinâmica atmosférica a longo prazo na região de estudo e suas implicações socioambientais, tendo em vista a vulnerabilidade a enchentes cada vez mais severas em diversos locais do Rio Grande do Sul.

De acordo com a UFSC (SeTIC-UFSC, 2024), as chuvas extremas de 2024 afetaram cerca de 90% do estado e 2,3 milhões de pessoas, deixando 640 mil desabrigados. Além disso, através de modelagem, observou-se possíveis alterações na probabilidade e intensidade das chuvas fortes para o tempo de retorno esperado para eventos de igual magnitude, chegando ao resultado de que as mudanças climáticas dobraram a probabilidade de ocorrência e aumentaram de 6 a 9% em relação à intensidade.

Segundo o Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (SPGS, 2021), o clima do estado corresponde a Temperado do tipo Subtropical, estando sob forte influência das massas de ar originadas da região polar e da área tropical continental e atlântica. Já com ênfase para a região do Vale do Taquari, Eckhardt *et al.* (2013), seguindo a Classificação Internacional de Köppen, apontam a região do vale como pertencente à zona fundamental temperada úmida (Cf), estando subdividida entre duas variedades: Cfa (subtropical) na parte inferior bacia e Cfb (temperado) a norte. A Figura 03 demonstra essa relação no Vale do Taquari.



**Figura 03:** Zoneamento climático de Köppen para as classificações Cfa (clima subtropical, com verão quente) e Cfb (clima temperado, com verão ameno) para o território nacional. Aproximação de escala de (A) para (C) para o Vale do Taquari. Fonte de dados: Centro de Estudos da Metrópole (2021); (IBGE, 2025).

A classificação de Vladimir Köppen provém do século XIX e foi aperfeiçoada posteriormente por Rudolf Geiger no século XX. Assim, a classificação agora conhecida como Köppen-Geiger, parte da premissa que existem 5 grupos climáticos principais que se subdividem em outras 30 subclasses. De acordo com Fritzsons; Wrege; Mantovani (2015), a variedade "Cfa" apresenta a temperatura do mês mais quente superior à "Cfb", sendo esta última restrita ao planalto basáltico superior e ao escudo Sul-Rio-Grandense, enquanto a "Cfa" pertence às demais áreas do estado.

Análises mais recentes, como propostas por Beck *et al.* (2023), consideram que entre 1901-1930 a 1991-2020 cerca de 5% da superfície global (desconsiderando a Antártica) migrou de uma classificação para outra. Além disso, até 2099 esse número pode subir para o marco de 13%, considerando as perspectivas da dinâmica climática atual, baseadas nas taxas de emissões de gases efeito estufa (GEE) e suas tendências futuras. O estudo leva em consideração

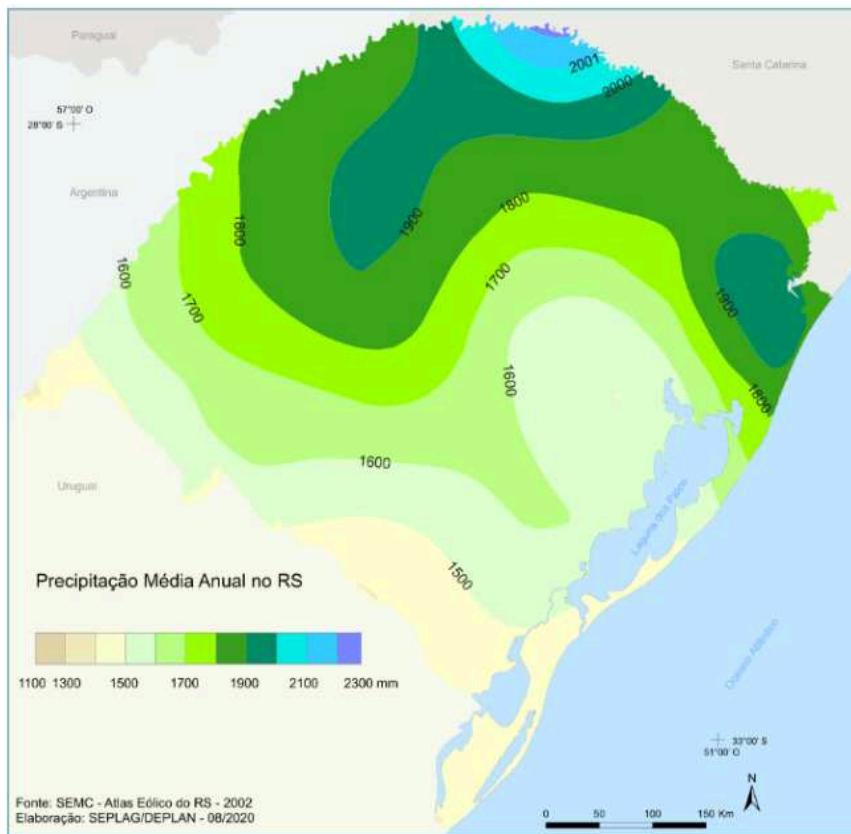
cenários de alterações climáticas com base nas mudanças socioeconômicas globais projetadas até 2100 e permite, a partir dele, refletir sobre os impactos diretos das mudanças climáticas na alteração da classificação do clima.

## 2.2.2 Pluviosidade

A compreensão dos ECE's exige uma análise aprofundada dos padrões pluviométricos locais e regionais. O estudo da pluviosidade, incluindo suas variações espaciais e temporais, é fundamental para identificar alterações nos regimes de precipitação e possíveis tendências futuras. Além disso, os dados pluviométricos fornecem subsídios essenciais para avaliar riscos hidrometeorológicos, como secas prolongadas e inundações severas, permitindo o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação mais eficazes. Assim, a análise pluviométrica torna-se uma ferramenta essencial para a previsão e monitoramento de eventos climáticos extremos, contribuindo para o planejamento ações de mitigação e resiliência.

Ao analisar o contexto pluviométrico do Rio Grande do Sul de acordo com o Atlas Socioeconômico (SPGS, 2021), desenvolvido para este estado, verifica-se que o volume de chuvas varia principalmente quando se compara a região norte com as demais porções do estado. Observa-se que a média total para o Rio Grande do Sul está entre 1.299 e 1.500mm, enquanto que para norte esses valores encontram-se entre 1.500 e 1.800mm. Além disso, os eventos de maior intensidade de chuvas ocorrem no nordeste do estado, com foco na região situada na encosta do planalto.

Pode-se afirmar que essa região coincide com uma ampla área da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas, sendo a captação da água pluvial diretamente vinculada à sua cabeceira, localizada nos Campos de Cima da Serra, em altitudes superiores a 1.000 metros. A maioria dos cursos d'água dessa porção elevada é drenada inicialmente pelo rio Tainhas, que, por sua vez, desemboca no rio das Antas e, posteriormente, no rio Taquari (Ritter, 2023). A figura abaixo (Figura 05) indica a precipitação média anual do Rio Grande do Sul, presente, também, no atlas socioeconômico (SPGS, 2021).



**Figura 04:** Precipitação média anual no Rio Grande do Sul demonstrando o aumento das pluviosidade conforme se avança para a região norte-nordeste. Presente no Atlas Socioeconômico de 2021 para o estado do Rio Grande do Sul. Fonte: (SPGS, 2021).

Com foco na região do estudo, isto é, a área compreendida pelo Vale do Taquari, a pluviosidade média anual varia entre 1500 a 1800 mm. A imagem abaixo (Figura 06) apresenta a distribuição espacial segundo o banco de dados da rede hidrometeorológica nacional, compilados e produzidos pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), disponibilizados em sua *homepage* e no Catálogo de Metadados da ANA, compilando informações 1977 a 2006 (ANA, 2016). Observa-se na figura que a pluviosidade aumenta conforme se avança para o norte do vale.



**Figura 05:** Isoetas de precipitação média anual (mm de chuva) - Série 1977 a 2006 para o Vale do Taquari. Progressão de detalhe entre (A), (B) e (C) . Fonte de dados: ANA (2016); IBGE (2025).

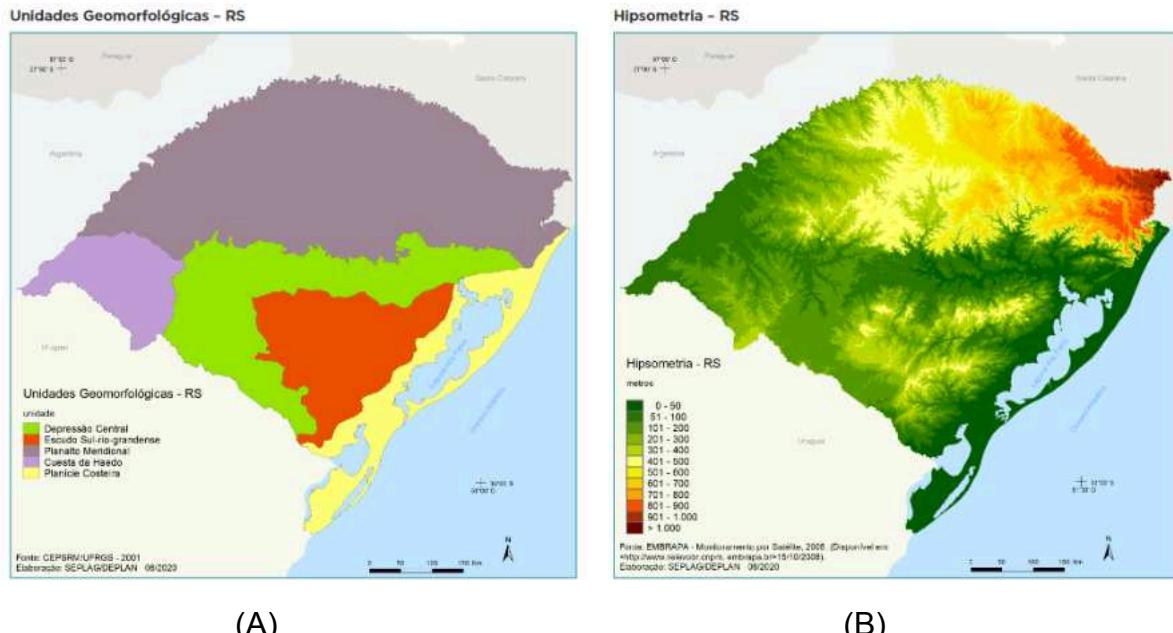
### 2.2.3 Geomorfologia

A geomorfologia é um dos principais aspectos observados para se compreender a dinâmica do contexto físico-geográfico de uma região, com implicações que vão desde a análise de processos naturais até influências socioeconômicas, como a ocupação antrópica.

No contexto de análise das enchentes e intensidade das chuvas no Rio Grande do Sul, faz-se necessário o entendimento dos aspectos geomorfológicos para estabelecer outras condicionantes de processos físicos, como por exemplo, movimentos de massa, áreas suscetíveis à erosão e deposição, áreas de captação pluviométrica e características das drenagens. Além disso, as enchentes ocorridas no Rio Grande do Sul também estão condicionadas ao tipo de relevo na região e à interação antrópica, como as áreas do Vale do Taquari suscetíveis a inundações (Detoni *et al.*, 2024; Ferrer; Danéris; Marques, 2025).

De maneira geral, de acordo com o Atlas Socioeconômico do Rio Grande do

Sul (SPGS, 2021), o estado é dividido em cinco unidades geomorfológicas, representadas na Figura 06.A abaixo. Ademais, ao lado desse mapa, está apresentada a hipsometria do estado (Figura 6.B).



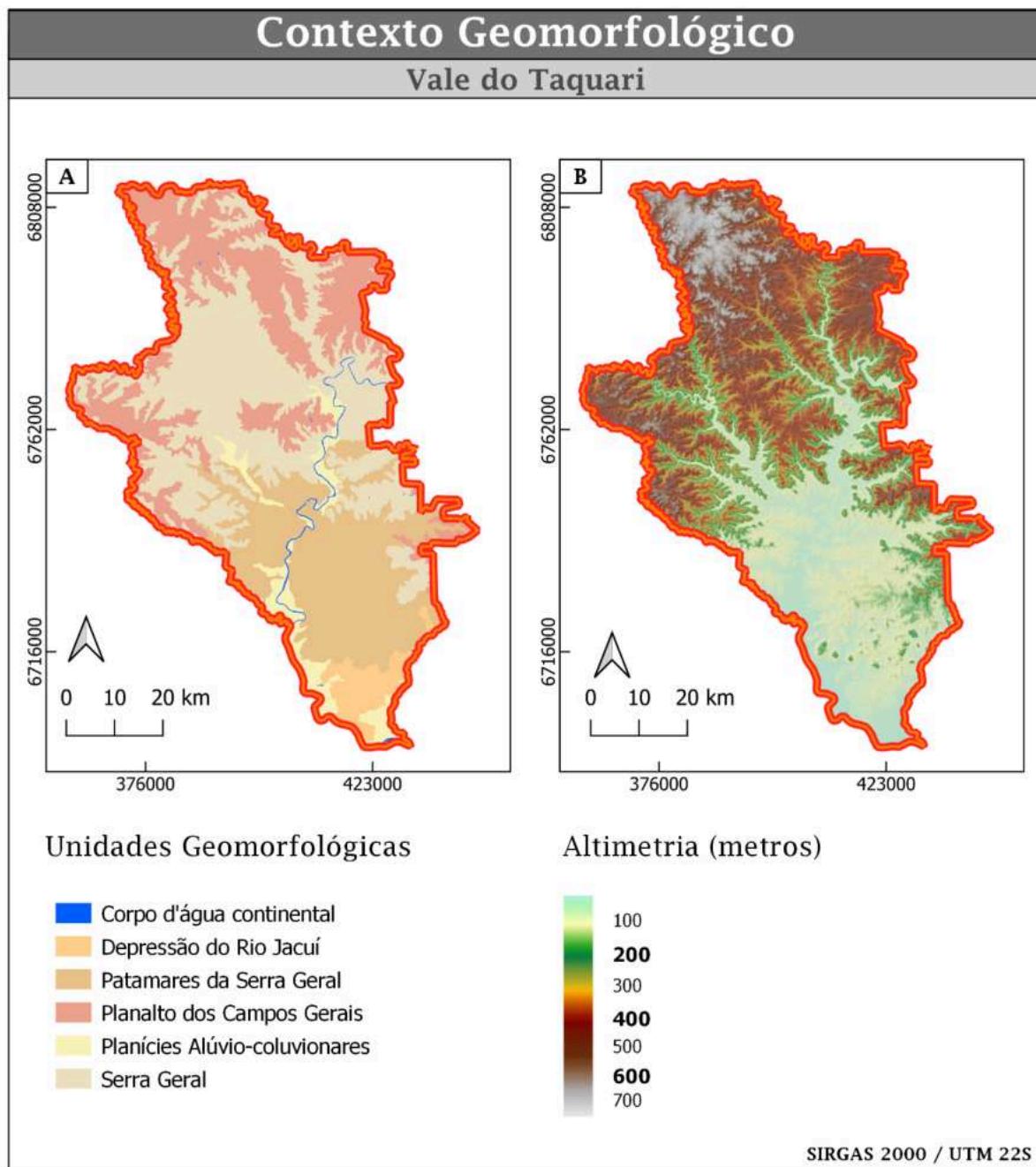
**Figura 06:** Mapa das Unidades Geomorfológicas (A) e Mapa de Hipsometria (B) para o estado do Rio Grande do Sul. Fonte: SPGS (2021).

Ainda segundo o atlas socioeconômico, a norte, encontra-se o Planalto Meridional, com sua formação associada ao contexto de derrames basálticos de idade mesozóica, sendo suas bordas relacionadas com a Serra Geral. Nesse setor, observa-se o aumento da altitude conforme se avança a nordeste do Rio Grande do Sul, alcançando 1.403 m no Pico do Monte Negro, em São José dos Ausentes. Na região inferior oeste, tem-se a Cuesta do Haedo, originada como consequência do processo proveniente da erosão diferencial do Planalto Meridional.

Ademais, ainda segundo esta fonte, tem-se a Depressão Central, localizada após essas duas compartimentações de maior altitude, compondo uma faixa extensa de terrenos mais baixos e de composição sedimentar. A região sul-sudeste do estado é representada pelo Escudo Cristalino Sul-Riograndense, com altitude não ultrapassando a cota dos 600 m. Além disso, a Planície Costeira é formada por uma faixa arenosa de 622 km que incorpora ocorrências de corpos lagunares, como a Lagoa dos Patos e Lagoa Mirim.

Com maior enfoque na área de estudo, a imagem abaixo dispõe o mapa geomorfológico (Figura 07. A) e hipsométrico (Figura 07. B). O mapa hipsométrico foi confeccionado a partir do MDE do SRTM (30m), enquanto o mapa geomorfológico

incorpora as subdivisões das unidades geomorfológicas (UGs) de acordo com o banco de dados do IBGE em escala 1:250.000 (IBGE, 2023a).



**Figura 07:** Mapa geomorfológico em escala 1:250.000 em (A) e Mapa hipsométrico SRTM em (B). A relação entre eles indica a presença de cinco unidades (fora o classificado como corpo d'água) e altitudes chegando acima de 700m (máxima de 794 m de acordo com o dataset do SRTM). Fonte de dados: IBGE (2023a); USGS (2000).

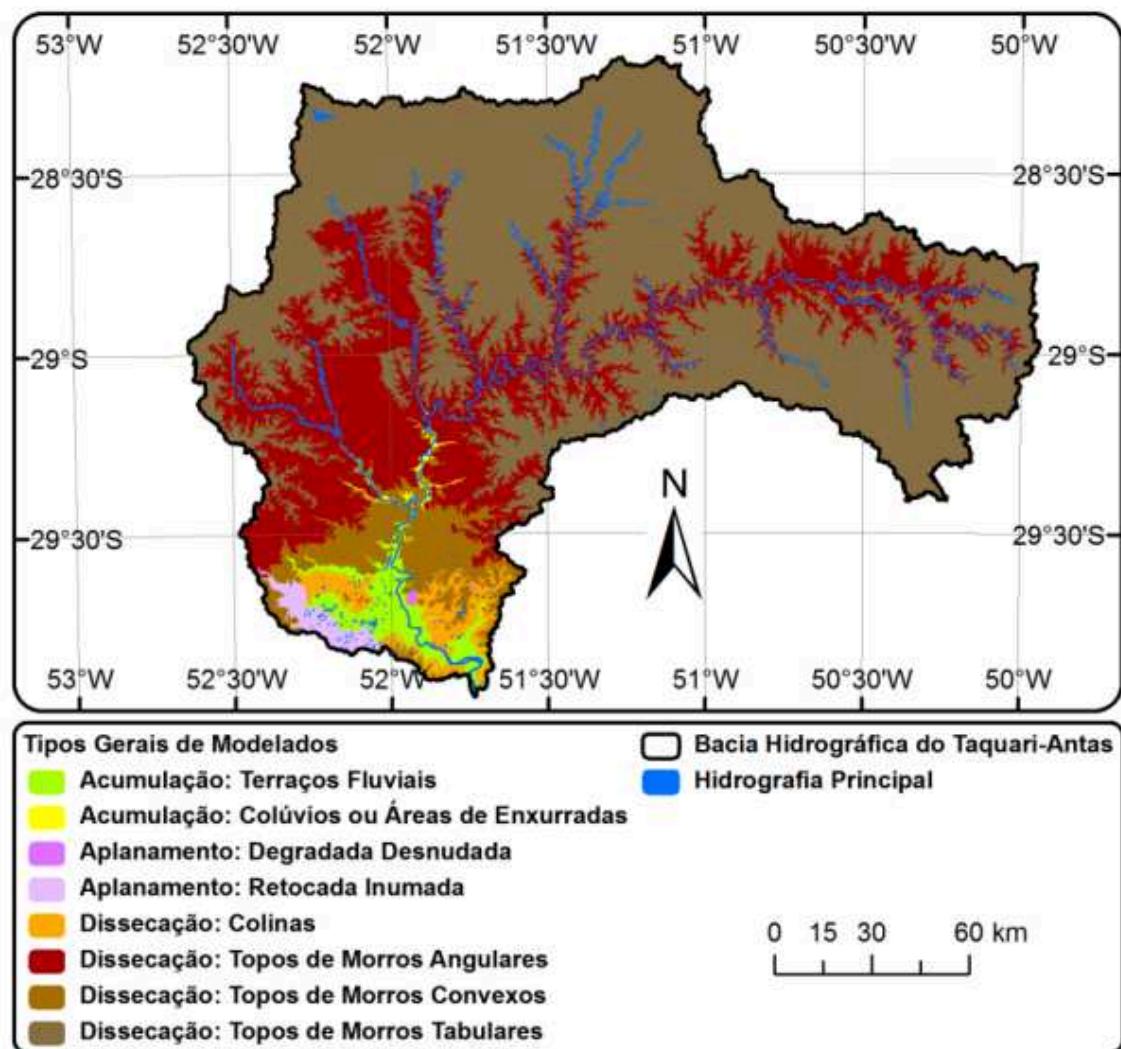
Segundo Oliveira *et al.* (2015), a UG Planícies Alúvio-coluvionares está associada à região da Planície Continental, enquanto a Depressão do Rio Jacuí

constitui parte da Depressão Central. Além disso, as UGs Serra Geral, Patamares da Serra Geral e Planalto dos Campos Gerais pertencem à região do Planalto das Araucárias, em que o principal fator que coordena a compartimentação corresponde à relação entre altimetria e declividade. Nesse contexto, os Patamares da Serra Geral encontram-se nas áreas de menor altitude deste planalto, com predominância de declives sutis, sendo seu limiar com a UG Serra Geral definida pela ruptura de relevo em decorrência da presença da escarpa erosiva. Em áreas mais elevadas, está a região do Planalto dos Campos Gerais, contendo topos de morros tanto tabulares quanto convexos, assim como declives menos acentuados. A divisão entre a Serra Geral e o Planalto dos Campos Gerais é dita pela ruptura de declives superiores das vertentes.

Uma das análises possíveis associadas à compartimentação das unidades geomorfológicas diz respeito à classificação espacial da relação entre áreas de acumulação e dissecação. Assim, é possível montar um panorama no que se refere a dinâmica de evolução do relevo e estabelecer contribuições quanto aos processos de movimentos de massa, a ênfase neste estudo.

Nesse sentido, de acordo com Oliveira *et al.* (2015), que conduziu uma proposta de interpretação e mapeamento geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas, foi possível verificar a possibilidade de detalhar os tipos de formas de relevo de modo mais preciso do que o observado na base do IBGE 1:250.000. Na imagem abaixo (Figura 08) está o resultado obtido pelos autores no que se refere a tipos de modelados predominantes na bacia. Neste produto, é possível observar a maior representatividade da dissecação fluvial, com proporções elevadas para os compartimentos de topos de morros tabulares com vales achatados (59,4%) e topos de morros angulares com vales aprofundados (29%).

Além disso, os modelados de acumulação, onde estão presentes os terraços, planícies e colúvios, correspondem em conjunto a 3,1% da área, enquanto que os modelados de aplanamento representam 1,1%. Como conclusão, pode-se dizer que a região da bacia hidrográfica é fortemente dissecada, marcando um relevo muito abrupto, com rios velozes e erosão acentuada (Oliveira *et al.*, 2015).



**Figura 08:** Tipos de Modelados e Formas do Relevo da Bacia do Rio Taquari-Antas, demonstrando a maior proporção de áreas de dissecação Oliveira *et al.* (2015).

#### 2.2.4 Vegetação

O estudo da vegetação e sua distribuição espacial favorece a compreensão do meio físico, sendo possível este indicar características do solo, clima e disponibilidade hídrica. Além disso é possível destacar sua importância para o estudo dos movimentos de massa, compreendendo sua influência nas propriedades hidráulicas e mecânicas do solo, assim como os efeitos da evapotranspiração e a capacidade que a cobertura vegetal possui de interceptar a água precipitada, evitando o contato direto da chuva com o solo.

De modo mais descritivo, Eckhardt (2005) identificou em sua análise de uso e cobertura da terra que a área vegetada para o Vale do Taquari inclui: Floresta Estacional Decidual, Floresta Ombrófila Mista, Vegetação Secundária, Vegetação

Energética, Campos (nativos e antrópicos) e áreas destinadas a Agricultura. No que diz respeito a esta última classificação, pode-se dizer que a expansão agrícola na região ocorreu a partir da margem do Rio Taquari e Forqueta, se estendendo posteriormente para maiores altitudes e chegando até as zonas de terraços dos arroios. Ademais, algumas das culturas produzidas no Vale do Taquari mencionadas pelo Perfil Socioeconômico COREDE (SPGG, 2015) são: milho, trigo, erva-mate, fumo, arroz e soja.

Na perspectiva dos movimentos de massa, a vegetação pode contribuir significativamente para a redução da suscetibilidade erosiva, atuando como elemento estabilizador das encostas por meio de condicionantes hidrológicos e mecânicos (Portocarrero *et al.*, 2006). As raízes das plantas reforçam a coesão do solo, aumentando sua resistência ao cisalhamento e dificultando a deflagração desses processos. Além disso, a cobertura vegetal funciona como um interceptor entre a água precipitada e o solo, reduzindo parcialmente o volume destinado ao substrato. Outro fator importante é o papel da evapotranspiração, associado a regulação dos níveis de saturação hídrica no perfil do solo. Assim, a manutenção e recuperação da cobertura vegetal em regiões vulneráveis pode ser mais do que uma necessidade ecológica, apresentando-se como uma estratégia de mitigação de riscos a movimentos de massa (Portocarrero *et al.*, 2006). Entretanto, é preciso atentar-se ao fato de que a relação entre as diferentes espécies de plantas em diferentes tipos de solo fazem com que esse comportamento varie. Segundo Lan *et al.* (2022), fatores como o tipo, densidade, saúde da vegetação e declividade associada podem influenciar, sendo necessário estudos mais específicos sobre essas variáveis para se determinar o papel da cobertura vegetal na estabilidade dos solos.

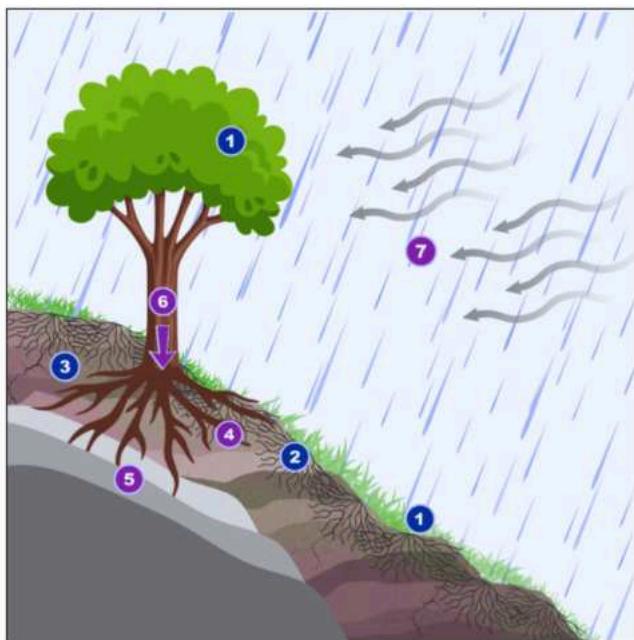
A imagem correspondente a Figura 09 apresenta a sistematização da influência da vegetação sobre a estabilidade das encostas, modificada de Portocarrero *et al.* (2006). Nele, estão os aspectos hidrológicos/de fluxo (associados ao ciclo hidrológico) e os aspectos mecânicos/de resistência (referente às interações físicas entre o sistema radicular, folhagem e o talude). Em seguida há uma explicação de acordo com a numeração apresentada, acompanhada pelo tipo de influência que o fator exerce para a estabilidade (benéfico ou adverso).

Quando considera-se a vegetação secundária, isto é, a vegetação formada após processos de regeneração natural ou induzida em áreas anteriormente

desmatadas ou degradadas, é possível que a influência sobre a estabilidade de encostas diminua sua eficácia. Embora essa cobertura vegetal ofereça certo grau de proteção, ela muita das vezes não apresenta a mesma complexidade da relação que a vegetação primária tinha com o substrato, resultando em menor capacidade de reforço coesivo do solo e de interceptação eficiente da água da chuva. Na região do Vale do Taquari, segundo os dados do MapBiomas, a cobertura da vegetação secundária é esparsa e se resume a 740 km<sup>2</sup> (MapBiomas, 2025).

Em contextos de ECE's, como as chuvas intensas e prolongadas que aconteceram no Rio Grande do Sul em 2024, a magnitude das forças envolvidas sobrepôs os efeitos estabilizadores proporcionados pela vegetação. Segundo Forbes *et al.* (2011), a cobertura vegetal em tais cenários extremos dificilmente é capaz de impedir a deflagração de deslizamentos de terra, por ultrapassarem os limiares naturais de resistência.

Além disso, as inundações ocorridas em 2024 no estado contribuíram diretamente para a degradação da vegetação nativa. De acordo com a nota do MapBiomas (MapBiomas, 2025), a Mata Atlântica foi o único bioma que manteve a mesma área de cobertura entre 2023 e 2024, contrastando com a redução das taxas de desmatamento observada nos demais biomas brasileiros, que, pela primeira vez em seis anos, apresentaram diminuição conjunta. No caso específico da Mata Atlântica, os impactos hidrometeorológicos no Rio Grande do Sul foram determinantes para a estagnação dos números, apesar do bioma ter registrado uma queda de quase 60% no desmatamento em 2023, com aproximadamente 13.212 hectares, em relação a 2022, que teve aproximadamente 29.721 hectares desmatados. De forma quantitativa, a tragédia de 2024 no Rio Grande do Sul impediu que houvesse uma redução adicional estimada em pelo menos 20% na área afetada (MapBiomas, 2025).



### Influência da cobertura vegetal sobre a estabilidade das encostas

➤ Aspectos Hidrológicos

➤ Aspectos Mecânicos

#### Aspectos Hidrológicos

#### Influência na Estabilidade

**1** A vegetação intercepta a água precipitada, ocasionando perdas por evaporação e adsorção, reduzindo a quantidade de água disponível para a infiltração.

Benéfico

**2** As raízes e galhos aumentam a rugosidade do terreno e a permeabilidade dos solos, gerando aumento na capacidade de infiltração, por vezes excessiva.

Adverso

**3** As raízes extraem umidade do solo, que é perdida para a atmosfera via transpiração, levando a uma redução das poro-pressões ou aumento da sucção. Em contrapartida, a redução da umidade pode acentuar o processo de formação de fendas e rachaduras, resultando em maior capacidade de infiltração

Benéfico / Adverso

#### Aspectos Mecânicos

#### Influência na Estabilidade

**4** As raízes reforçam o solo, aumentando a resistência ao cisalhamento

Benéfico

**5** As raízes podem estar ancoradas em substrato firme, provendo sustentação ao manto de solo acima na encosta através de arqueamento e suporte.

Benéfico

**6** O peso das árvores pode sobrecarregar a encosta, aumentando as componentes normais descendentes

Benéfico / Adverso

**7** A vegetação exposta aos ventos transmite forças dinâmicas às encostas.

Adverso

**Figura 09:** Influência da cobertura vegetal sob a estabilidade das encostas. A imagem contextualiza o papel da presença de vegetação em terreno inclinado e os principais fatores hidrológicos e mecânicos atuantes, numerados de 1 a 7 e detalhados. Fonte: modificado de Portocarrero *et al.* (2006).

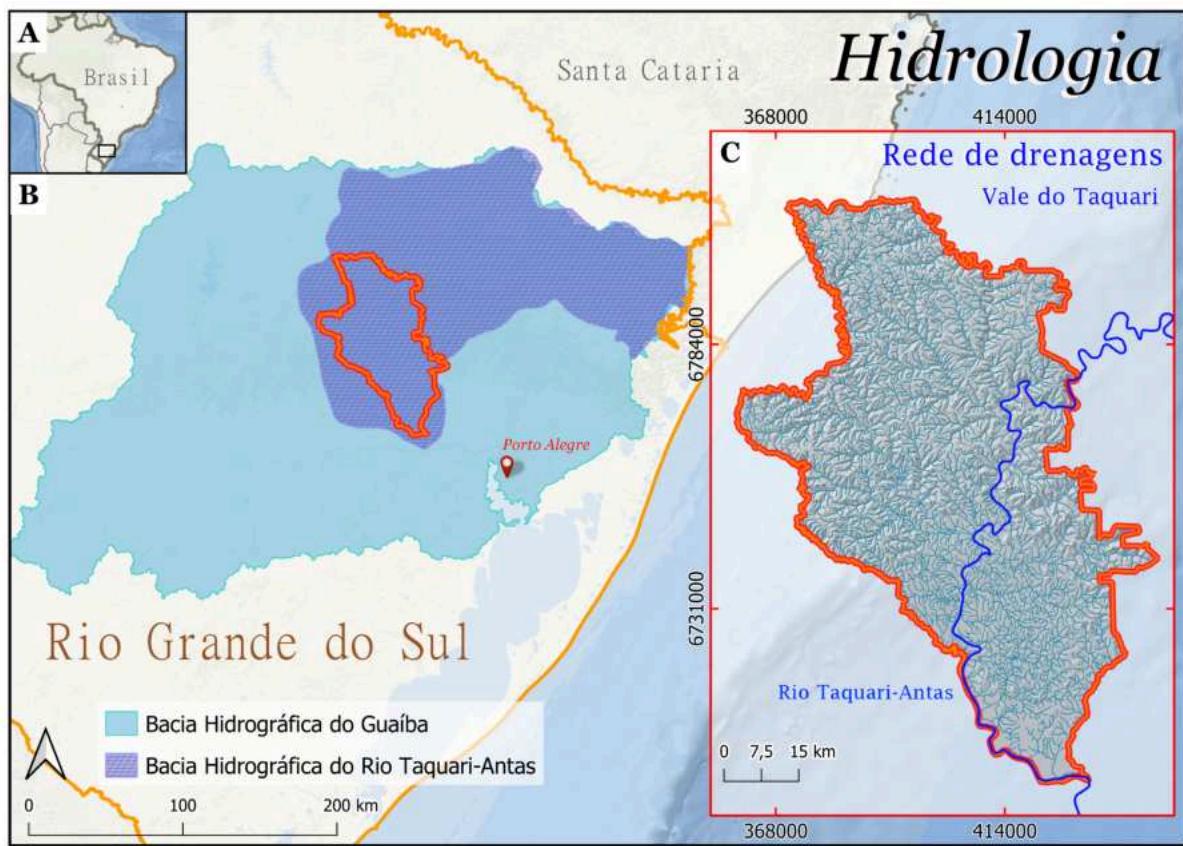
## 2.2.5 Hidrologia

De acordo com Meyer (1917), a Hidrologia é ciência que trata dos fenômenos associados à água em todos os seus estados, envolvendo sua distribuição e ocorrência na atmosfera, no solo e estratos rochosos, assim como a relação desses fenômenos com a vida e atividades do homem.

Dentro desse contexto, pode-se dizer que o estudo da hidrologia é essencial para a compreensão da dinâmica das bacias hidrográficas, permitindo a análise dos processos que regem o ciclo da água e suas interações com o meio físico e social. Além disso, em relação às inundações e movimentos de massa, foco deste estudo, a hidrologia fornece meios para entender os padrões de precipitação, escoamento e infiltração, que influenciam na ocorrência desses eventos.

O Vale do Taquari está localizado na Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas, que pertence à Bacia Hidrográfica do Guaíba (Figura 10). A nascente do Rio Taquari situa-se na Serra Geral, nas proximidades da região de Aparados da Serra (município de São José dos Ausentes) a uma altitude superior a 1.100m. Nesse trecho inicial, o rio é denominado "Rio das Antas" até a confluência com o Rio Carreiro, em Bento Gonçalves. A partir desse ponto, o curso do rio segue em direção oeste até chegar à cidade de Muçum, onde sua orientação muda para o sentido norte-sul, desaguando no Rio Jacuí após um percurso de aproximadamente 520 Km (Buffon *et al.*, 2021).

Em relação às suas características, pode-se dizer que até Muçum o rio percorre uma região acidentada, onde predominam vales profundos e margens abruptas. Esse comportamento se modifica a jusante do município, onde o relevo torna-se mais suave, associado a margens mais baixas. Além disso, o Rio Taquari conta com importantes afluentes, como os rios da Prata, Carreiro, Guaporé e Forqueta (Buffon *et al.*, 2021). Na Figura 09 encontra-se a localização do Vale do Taquari em meio ao seu contexto das bacias hidrográficas, assim como sua malha de drenagens, com destaque para o Rio Taquari-Antas.



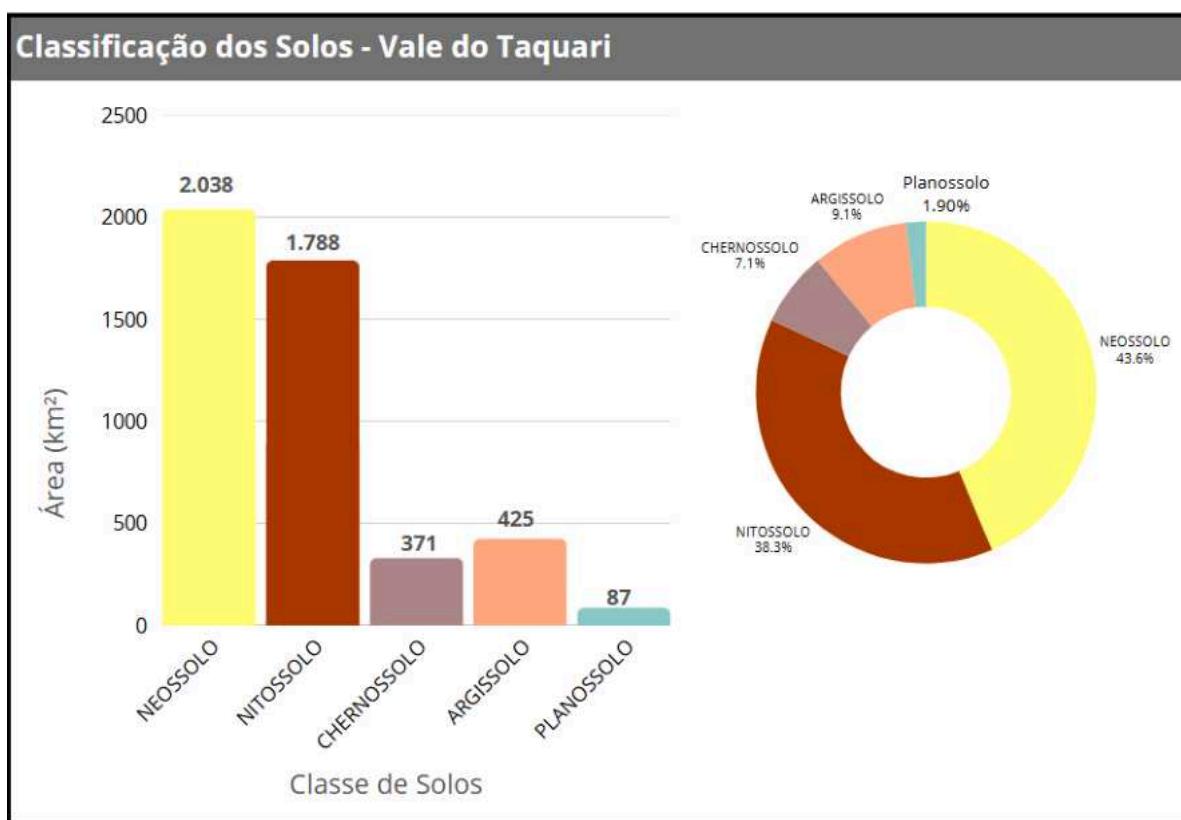
**Figura 10:** Contexto hidrológico do Vale do Taquari, compreendendo a Bacia Hidrográfica do Guaíba e a Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, assim como a rede de drenagens, com destaque para o Rio Taquari-Antas, sobrepondo o MDE do SRTM. Fonte de dados: ANA (2017); IBGE (2025); USGS (2000).

## 2.2.6 Pedologia

A Pedologia é a ciência que estuda a gênese, morfologia e classificação dos solos, buscando compreender a relação entre os fatores e processos de formação que influenciam os atributos físicos, químicos, mineralógicos e morfológicos destes, como textura, estrutura, cor, espessura e consistência (Pereira *et al.*, 2019). Esses atributos são essenciais para avaliar a estabilidade dos terrenos, especialmente em áreas suscetíveis a movimentos de massa. Em casos de eventos hidrológicos extremos, como chuvas intensas ou prolongadas, o conhecimento acerca da pedologia contribui para o entendimento de aspectos relevantes da dinâmica do solo, como permeabilidade, capacidade de retenção de água e coesão, que influenciam diretamente na infiltração, na saturação e no risco de instabilidade do terreno (Santos, 2007).

Com base no Mapa de Solos do Brasil, elaborado pelo IBGE e disponibilizado

em sua base de dados em escala 1:250.000 (IBGE, 2023b), a região do Vale do Taquari é composta predominantemente por Neossolos e Nitossolos, sendo possível, a partir desse conjunto de dados, obter informações quantitativas sobre a área e a proporção que cada classe ocupa no território. Assim, verificou-se que o Neossolo cobre aproximadamente 2.038 km<sup>2</sup>, correspondendo a mais de 40% da área total da região. Em contraste, o Planossolo apresenta a menor abrangência, com cerca de 87 km<sup>2</sup>, chegando a aproximadamente 2% da área analisada. Os gráficos a seguir (Figura 11) ilustram a distribuição dessas classes, tanto em termos absolutos e aproximados (km<sup>2</sup>) quanto proporcionais (%).



**Figura 11:** Distribuição das classes de solo para a região do Vale do Taquari, com um histograma mostrando a variação de área (A) e gráfico de rosca (B) apresentando a porcentagem de cada classe. Fonte de dados: IBGE (2023b).

Além disso, a Figura 12.A apresenta o mapa pedológico do Vale do Taquari, permitindo visualizar a distribuição espacial das classes de solos e suas correlações com as principais unidades geomorfológicas. O argissolo predomina na porção sul do vale, correspondente à Depressão do Rio Jacuí. O chernossolo distribui-se preferencialmente ao longo das planícies de inundação, acompanhando o eixo noroeste-sudoeste do Rio Taquari, embora também ocorra em áreas de maior altitude e declividade no setor norte. Os nitossolos e neossolos possuem uma

cobertura mais ampla e variada, sendo responsáveis por mais de 80% do solo presente na região, com forte associação aos Patamares da Serra Geral, ao Planalto dos Campos Gerais e à própria Serra Geral. Por fim, o planossolo apresenta ocorrência pontual e restrita, limitando-se a pequenas faixas à sul.

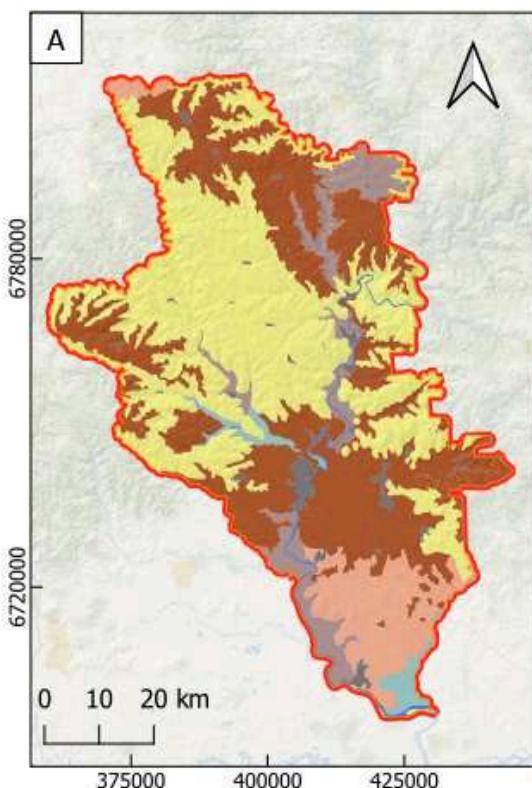
Ao comparar a distribuição dos solos com o mapa de suscetibilidade à erosão hídrica, elaborado pela Embrapa (2022) (Figura 12.B), observa-se uma certa correspondência entre as classes pedológicas e o potencial erosivo dos solos. Nele, é possível observar, por exemplo, que área de argissolo e planossolo apresentam maior suscetibilidade. No entanto, essa relação não é direta nem absoluta.

O referido mapa, de escala 1:250.000, considera não apenas as características intrínsecas dos solos, mas também a exposição destes aos processos erosivos, o que amplia a complexidade da análise. Nesse caso, a suscetibilidade é determinada com base em dados obtidos de levantamentos pedológicos, declividade do terreno e erosividade das chuvas. Já a exposição leva principalmente em conta as classes de uso e cobertura da terra, além da presença de pastagens degradadas. A integração dessas variáveis foi realizada por meio de modelagens matemáticas orientadas por interpretações especializadas, utilizando chaves de decisão específicas (Embrapa, 2022). Dessa forma, ainda que o tipo de solo seja um elemento essencial na avaliação do risco de erosão e movimentos de massa, é necessário considerar outros fatores complementares para uma análise mais robusta e realista do território.

Durante o ECE 2024, caracterizado por chuvas de intensidade e duração elevadas, tornou-se evidente que a ocorrência de movimentos de massa não esteve restrita apenas às áreas com alta suscetibilidade à erosão. Nesse contexto, mesmo regiões com baixa e média vulnerabilidade registraram a ocorrência desses processos, demonstrando que, sob condições climáticas extremas, a influência da predisposição natural do solo e do relevo é significativamente reduzida frente à magnitude dos fatores externos. Isso reforça a importância de considerar a interação entre condições climáticas excepcionais e características do meio físico ao planejar ações preventivas e estratégias de ordenamento territorial.

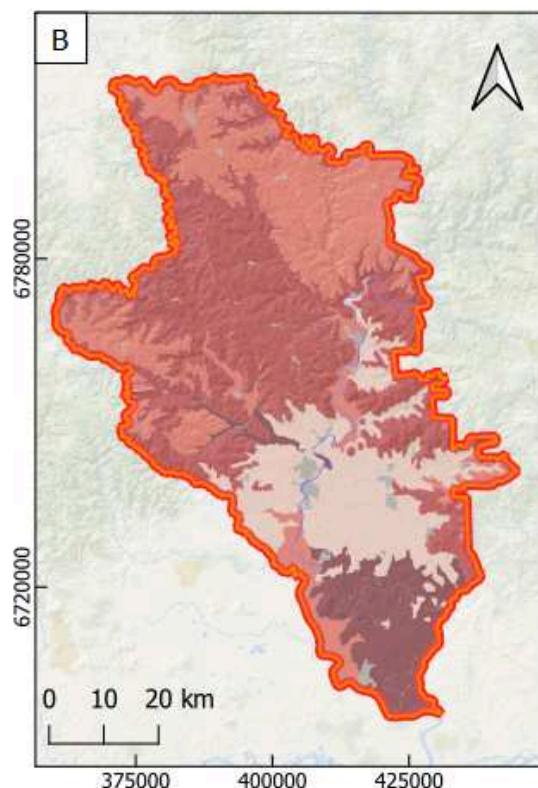
## Pedologia e Suscetibilidade a Erosão Hídrica

### Vale do Taquari



Classes de Solos (SiBCS)

- Argissolo
- Chernossolo
- Neossolo
- Nitossolo
- Planossolo



Suscetibilidade dos Solos a Erosão Hídrica

- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

#### Elementos Cartográficos

- Vale do Taquari
- Área Urbana
- Corpos d'água continental

SIRGAS 2000 / UTM 22S

**Figura 12:** Mapa de solos (A) e mapa de suscetibilidade dos solos à erosão hídrica (B) para o Vale do Taquari. A partir da análise comparativa entre os dois quadros, é possível observar semelhanças entre a classificação do solo e a vulnerabilidade destes a erosão hídrica. Entretanto, essa comparação não deve ser feita de forma direta e absoluta, pois existem condicionantes associados a outros fatores físicos, assim como nível de exposição da região a processos erosivos. Fonte de dados: Embrapa (2022); IBGE (2023b).

## 2.3 Uso e Ocupação da Terra

O termo uso e ocupação da terra refere-se a como o meio físico terrestre é explorado e modificado pelas atividades humanas e processos naturais, sendo suscetível a transformações ao longo do tempo. Assim, seu monitoramento é essencial para compreender a dinâmica da evolução territorial, e tem substancial importância para a análise dos movimentos de massa, pois permite identificar áreas de risco e avaliar os impactos das atividades humanas na estabilidade dos solos.

Nessa perspectiva, análises em séries temporais por meio de ferramentas de sensoriamento remoto tornam-se instrumentos eficazes para o monitoramento de atributos ambientais, permitindo estudos em diferentes escalas, conforme o nível de detalhe desejado. No Brasil, destaca-se a plataforma MapBiomass, uma rede colaborativa composta por ONGs, universidades e empresas de tecnologia, que atua com o objetivo de mapear anualmente o uso e cobertura da terra em extensão nacional, além de trabalhar com produtos de temas transversais. A Figura 13 apresenta os cenários de uso e cobertura da terra no Vale do Taquari para os anos de 1985 (Figura 13.A) e 2023 (Figura 13.B), gerados a partir da Coleção 9 do MapBiomass (MapBiomass, 2025), com resolução espacial de 30 metros. As imagens foram processadas no ambiente *Google Earth Engine* e posteriormente refinadas no software QGIS.

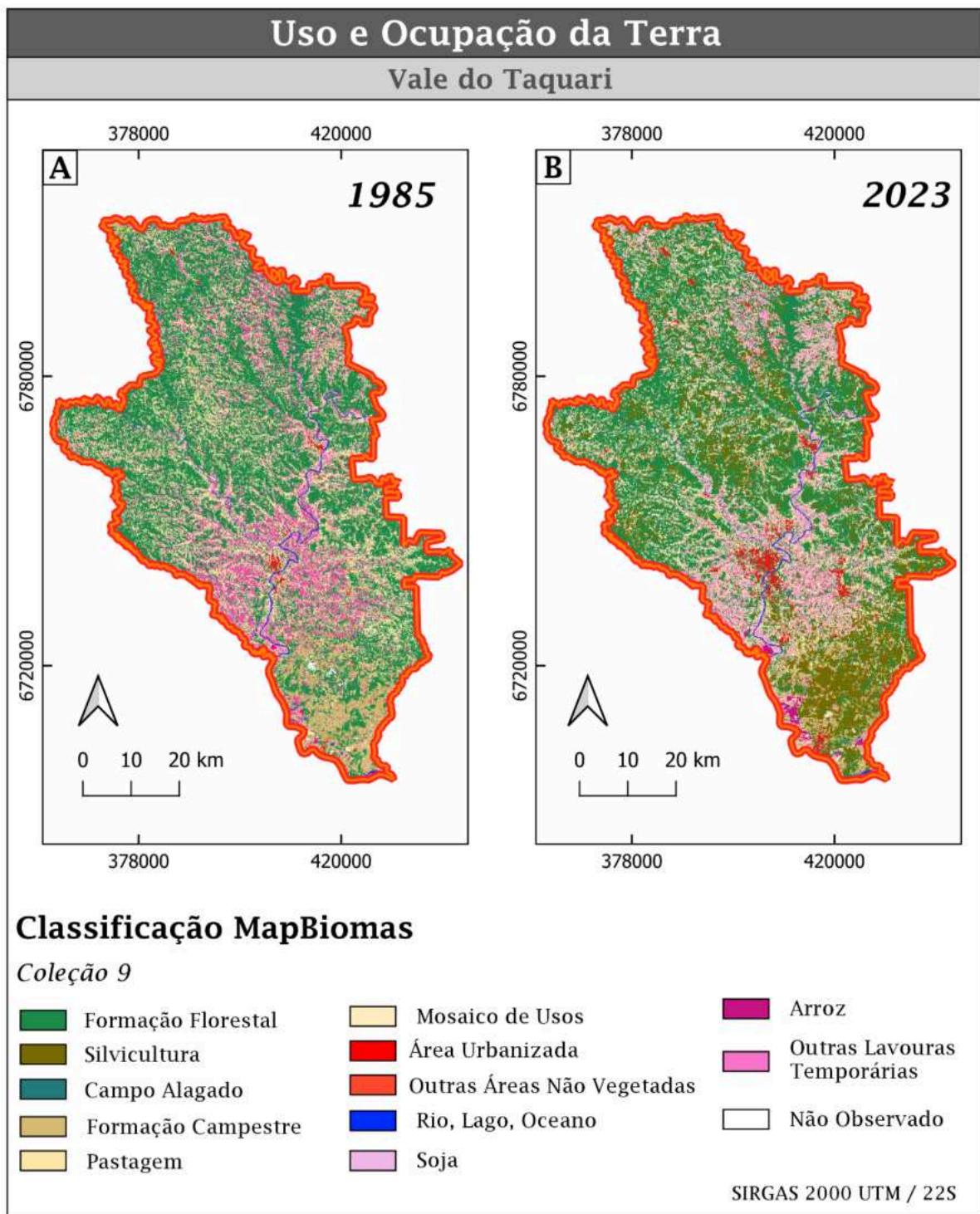
A partir desse produto, observou-se uma mudança significativa na cobertura de determinadas classes, refletindo a dinâmica territorial marcada pelo expressivo crescimento da urbanização e da silvicultura, além do aumento das áreas destinadas à produção de soja e arroz (estando estas entre as principais atividades econômicas do Vale do Taquari). Em contrapartida, nota-se a redução da cobertura vegetal em diversas partes do território, impactando especialmente as classes de formação florestal e formação campestre.

No que diz respeito à análise dos movimentos de massa, motivos socioeconômicos tornam essencial a compreensão da configuração espacial das áreas urbanas, pois os seus processos de expansão podem estar associados a ocupação de encostas instáveis, margens fluviais e outras zonas vulneráveis. No contexto do Rio Grande do Sul, a catástrofe de 2024 impactou severamente os municípios densamente urbanizados e localizados em áreas suscetíveis, demonstrando a necessidade de aplicar os conhecimentos sobre a distribuição das áreas urbanas para a melhor gestão territorial e elaboração de políticas públicas.

Nesse escopo, destaca-se a contribuição do MapBiomass, cuja atuação de análises de temas transversais ao uso e ocupação da terra atende a demandas sensíveis no país, incluindo um módulo específico para o mapeamento das áreas urbanizadas no Brasil, abrangendo o período de 1985 a 2023 (MapBiomass, 2024b). A partir desse banco de dados, é possível analisar as classes que foram substituídas para dar lugar à expansão urbana, assim como outros produtos, como proximidade hídrica, risco e declividade.

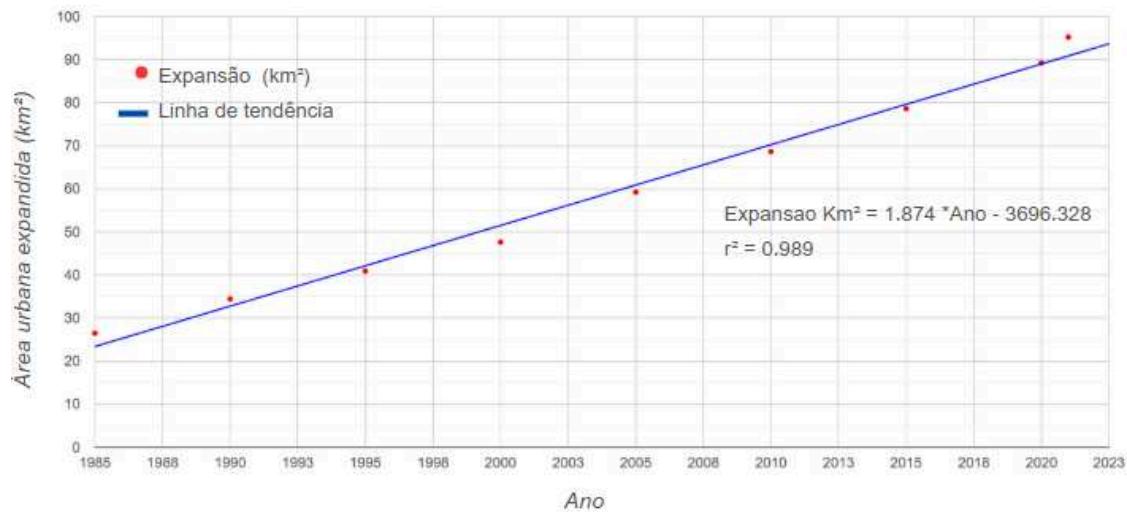
No caso do Vale do Taquari, observou-se uma tendência de crescimento linear no intervalo descrito, como apresentado pelo gráfico da Figura 14. Além disso, as principais transições de classe obtidas incorporam áreas anteriormente vegetadas, seja por ação antrópica ou cobertura natural, como lavouras, pastagens, formações florestais e campestres. A Figura 15 apresenta um diagrama de Sankey, que representa graficamente os fluxos de transição entre categorias de uso do solo, destacando as classes que foram convertidas em áreas urbanizadas no período de 1985 a 2023. Nesse tipo de diagrama, a espessura das setas é proporcional à magnitude das transformações ocorridas.

Outro aspecto a ser analisado corresponde ao avanço das áreas urbanas sobre regiões próximas a cursos d'água. Segundo a nota do MapBiomass (2025a), no contexto brasileiro, aproximadamente 25% da expansão urbana registrada entre 1985 e 2023 (correspondente a 648 mil hectares) ocorreu em zonas situadas a até três metros verticais de rios e córregos, caracterizando-as como vulneráveis a inundações. Além disso, 56,7% dessa ocupação se consolidou nos últimos 38 anos, reforçando a tendência de expansão urbana em zonas de alto risco. Esse cenário evidencia a ampliação da exposição urbana a eventos climáticos extremos, como os registrados no Rio Grande do Sul em 2024, com o Vale do Taquari apresentando situações mais críticas em municípios como Encantado, Roca Sales e Lajeado. De acordo com o banco de dados de proximidade hídrica (MapBiomass, 2024b), a região do vale apresenta cerca de 18 km<sup>2</sup> com proximidades entre 0 e 6 metros.



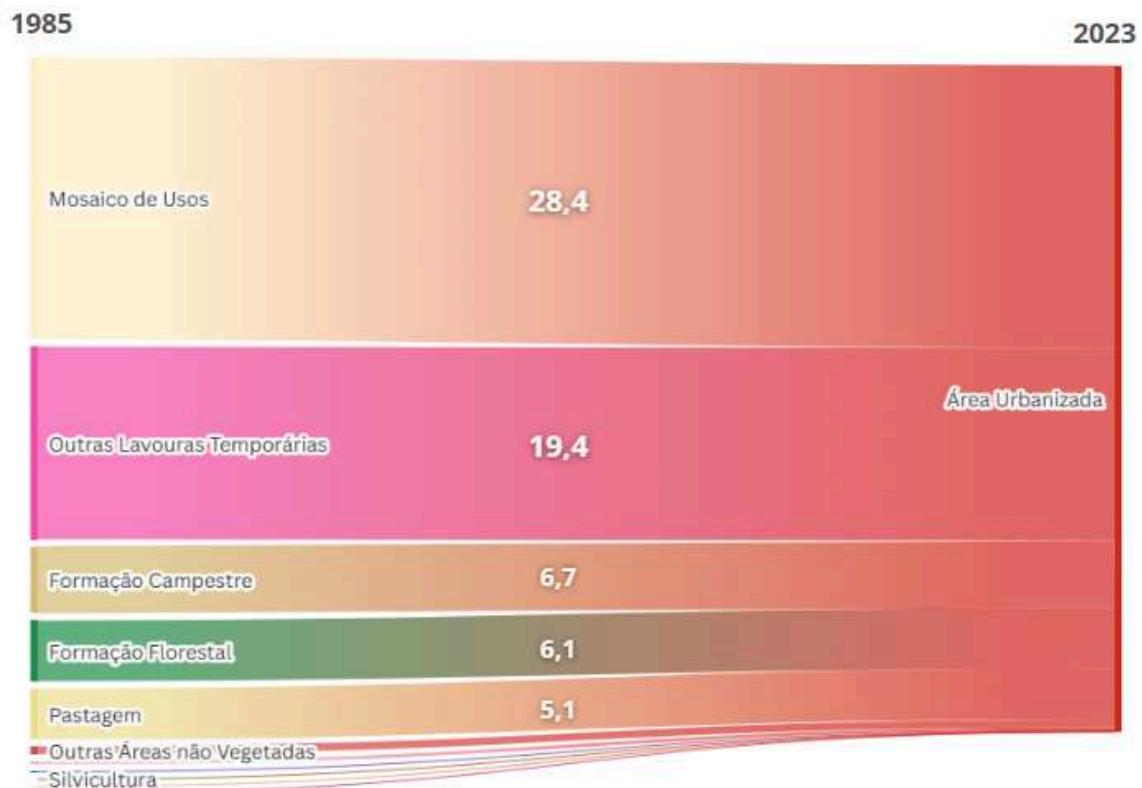
**Figura 13:** Uso e Ocupação da Terra para os anos 1985 (A) e 2023 (B) segundo a Coleção 9 da plataforma MapBiomas. Observa-se a mudança da configuração das classes, com destaque para o aumento da silvicultura e da área urbanizada, assim como para as culturas de soja e arroz. Fonte de dados: MapBiomas Brasil (2025b).

Evolução da expansão urbana no Vale do Taquari (1985 a 2023)



**Figura 14:** Gráfico apresentando a evolução da expansão urbana no Vale do Taquari no intervalo entre 1985 a 2023, segundo o banco de dados do MapBiomas. Fonte de dados: MapBiomas (2024b).

#### Transições para área urbanizada no Vale do Taquari (Km<sup>2</sup>)

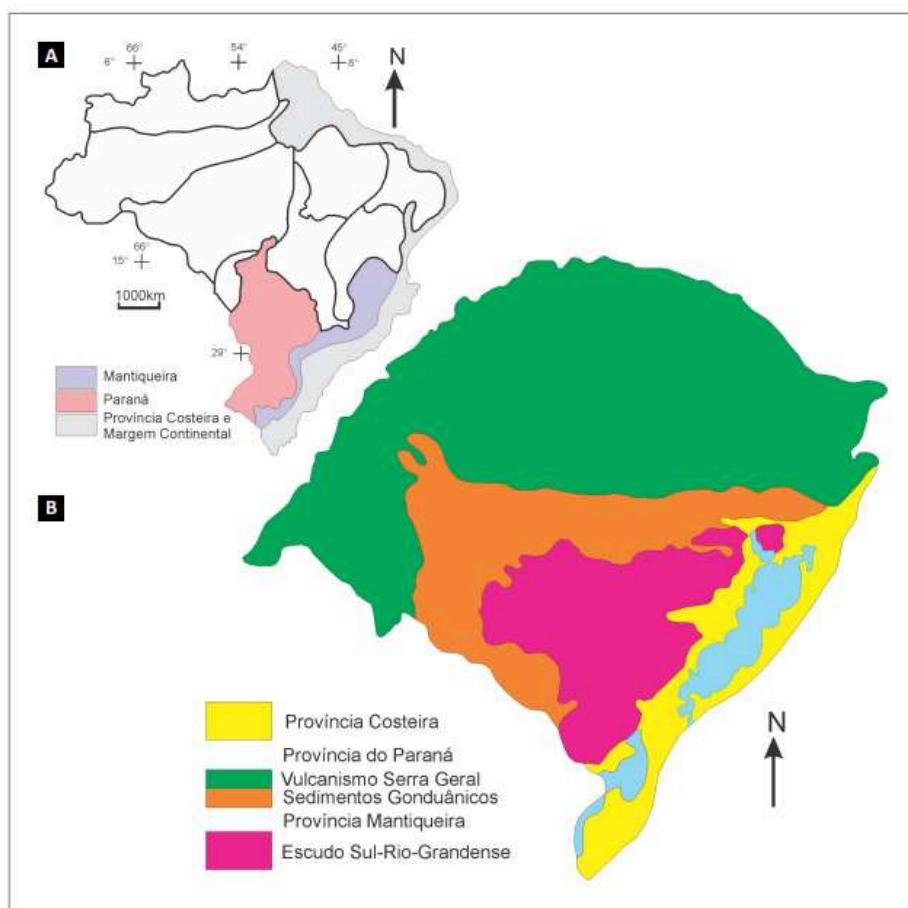


**Figura 15:** Transições para área urbanizada no Vale do Taquari em km<sup>2</sup> considerando as diferenças de área, aproximadas, entre 1985 e 2023. Destaca-se como principais mudanças as categorias Mosaico de Usos e Outras Lavouras Temporárias. Fonte de dados: (MapBiomas, 2024b).

### 3. GEOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL

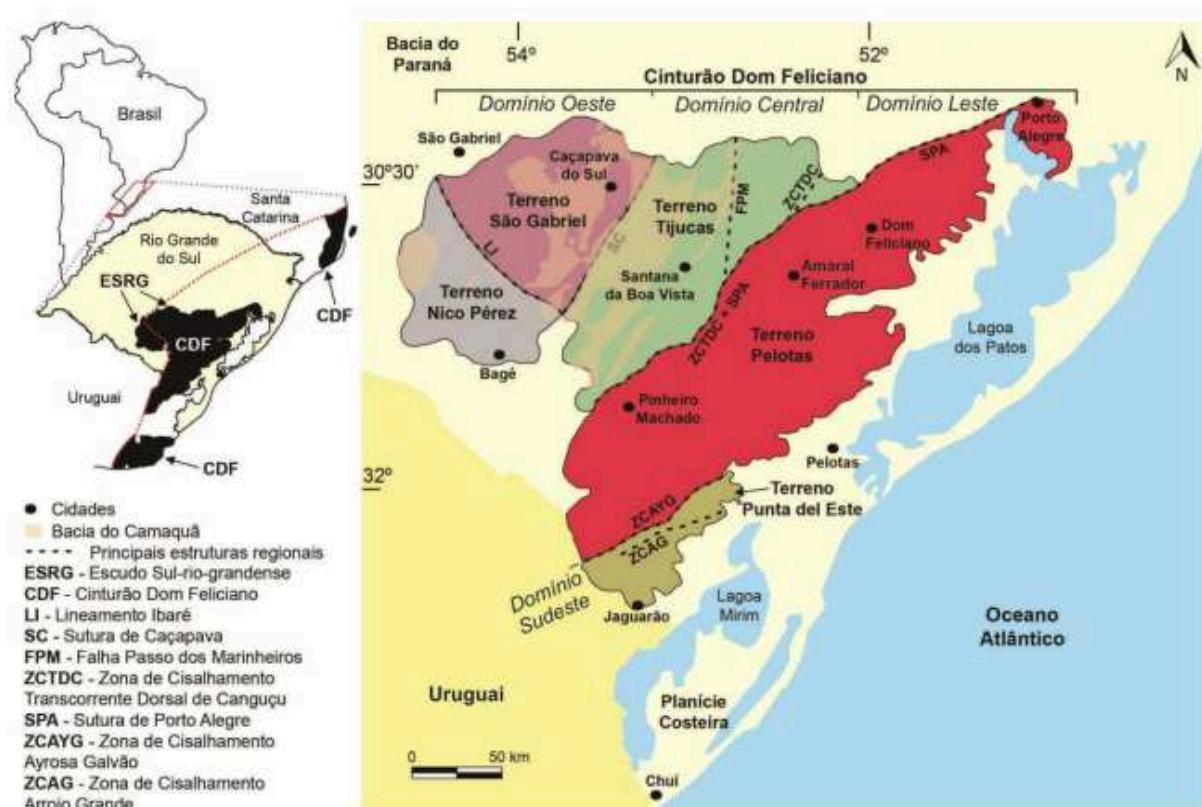
#### 3.1 Geologia Regional

De acordo com Almeida *et al.* (1977), é possível identificar no Brasil dez províncias estruturais, sendo considerado para sua delimitação fatores como grandes feições estruturais, bordas erosivas de grandes bacias sedimentares, zonas metamórficas e outros limites convencionais (dados por indefinição geológica). Dentro desse contexto de classificação tradicional, a região do Rio Grande do Sul é composta pelas províncias Paraná, Mantiqueira e Costeira/Margem Continental (Figura 16. A). Em trabalhos posteriores (Porcher & Lopes, 2000) subdividiram a Província Paraná entre o Vulcanismo Serra Geral e Sedimentos Gondwânicos. Além disso, foi destacado o Escudo-Rio-Grandense, que está associado à Província Mantiqueira (Figura 16.B).



**Figura 16:** (A) Províncias estruturais brasileiras no Rio Grande do Sul e sua continuidade pelo Brasil por Almeida *et al.* (1977); e (B) Províncias geológicas do Rio Grande do Sul (Porcher & Lopes, 2000). Fonte: Laux (2021)

Em relação à formação dessas províncias geológicas, pode-se dizer que a mais antiga refere-se ao Escudo-Rio-Grandense. De acordo com Cesar (1980), essa região é composta pelo Cráton Rio de La Plata, poupado pela atividade do Ciclo Brasiliense, assim como o Cinturão Dom Feliciano, que corresponde à faixa móvel marginal a este núcleo cratônico e condiz aos efeitos do Brasiliense na porção sudeste da Plataforma Sul-Americana. Em síntese, o Cráton Rio de La Plata diz respeito à principal ocorrência de rochas paleoproterozoicas no estado, enquanto o Cinturão Dom Feliciano trata de uma faixa móvel neoproterozoica que ocupa a porção leste do escudo (Laux, 2021). Além disso, pode-se dizer que essa compartimentação é formada por uma trama tectono-estratigráfica complexa que comporta rochas ígneas, metamórficas e sedimentares controladas por lineamentos regionais NE-SW e NW-SE (Porcher & Lopes, 2000). A imagem abaixo (Figura 17) situa o Escudo-Rio-Grandense (ESRG) no contexto do Rio Grande do Sul, individualizando o Terreno Nico Pérez do Cinturão Dom Feliciano e demonstrando também as principais estruturas regionais.



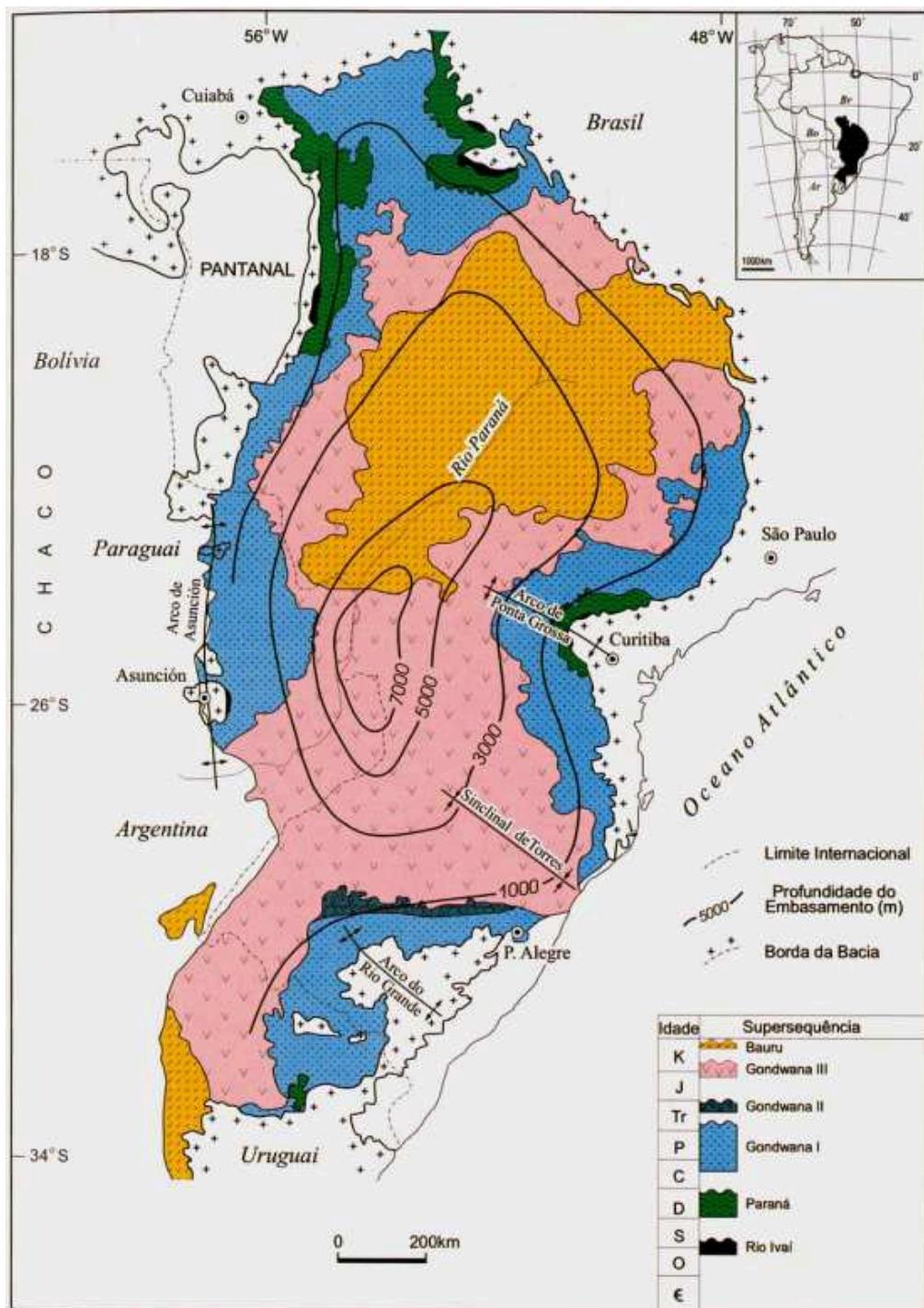
**Figura 17:** Mapa geológico simplificado apresentando os principais terrenos e estruturas que fazem parte da compartimentação tectônica do Escudo Rio-Grandense (ESRG). Fonte: Pazzaglia *et al.* (2023).

Em relação à evolução geológica, é consenso na literatura que o Escudo-Rio-Grandense é resultado de colagem orogênica de ambientes geotectônicos distintos, apesar dos modelos genético-evolutivos variarem (Porcher & Lopes, 2000). Laux *et al.* (2023) sintetizam que, de acordo com a bibliografia, a evolução do escudo está associado ao Ciclo Brasiliano, nas orogêneses São Gabriel (Brasiliano I, entre 890 e 690 Ma) e Dom Feliciano (Brasiliano II e III, com idades de 640 e 540 Ma). As porções pré-cambrianas (ou referentes ao início do Paleozoico) no Rio Grande do Sul são classicamente identificados pelo Arco São Gabriel, Cinturão Dom Feliciano e partes do Cráton Rio de La Plata, sendo sua formação e compartimentação relacionadas aos eventos de separação do Supercontinente Rodínia e aglutinação do Supercontinente Gondwana. Nestes blocos, as assinaturas isotópicas indicam idades mais antigas, de 2,3 Ga (correspondente ao embasamento) assim como menores, de 1,2 Ga (associadas à Orogênese São Gabriel). Além disso, um terceiro intervalo de idade identificado, entre 2,3 Ga e 1,2 Ga, é interpretado como referente à Orogênese Dom Feliciano (Laux *et al.*, 2023).

O escudo é limitado a norte e oeste pela Província Paraná, referente a Bacia do Paraná, com formações sedimentares depositadas entre o Permiano e Jurássico, sendo intrudidas e sobrepostas por rochas associadas ao magmatismo Serra Geral, referente ao Cretáceo (Porcher & Lopes, 2000). A bacia recobre dois terços do território do Rio Grande do Sul e suas principais exposições são referentes aos grupos Itararé, Guatá, Passa Dois, e Rosário do Sul, assim como as rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral e arenitos da Formação Botucatu (na região do planalto) (Laux, 2021).

A evolução geológica da Bacia do Paraná foi direcionada expressivamente pelos efeitos da aglutinação do Gondwana no domínio sul-occidental durante o Fanerozóico. Esta bacia está situada sob um embasamento cratônico e circundada por cinturões colisionais, assim como bacias de antepaís (relacionadas a ciclos de subsidência temporalmente condizentes com as principais fases orogênicas, com a aglutinação de blocos alóctones ao paleocontinente) (Milani & Ramos, 1988). Além disso, estratigraficamente, é possível definir seis Supersequências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo), as quais representam intervalos de deposição na bacia, sendo separadas por discordâncias de caráter inter regional (Milani & Ramos, 1988 ; Milani

et al., 2007). A imagem abaixo (Figura 18), retirada de Milani (2004), apresenta o mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná para essas Supersequências.

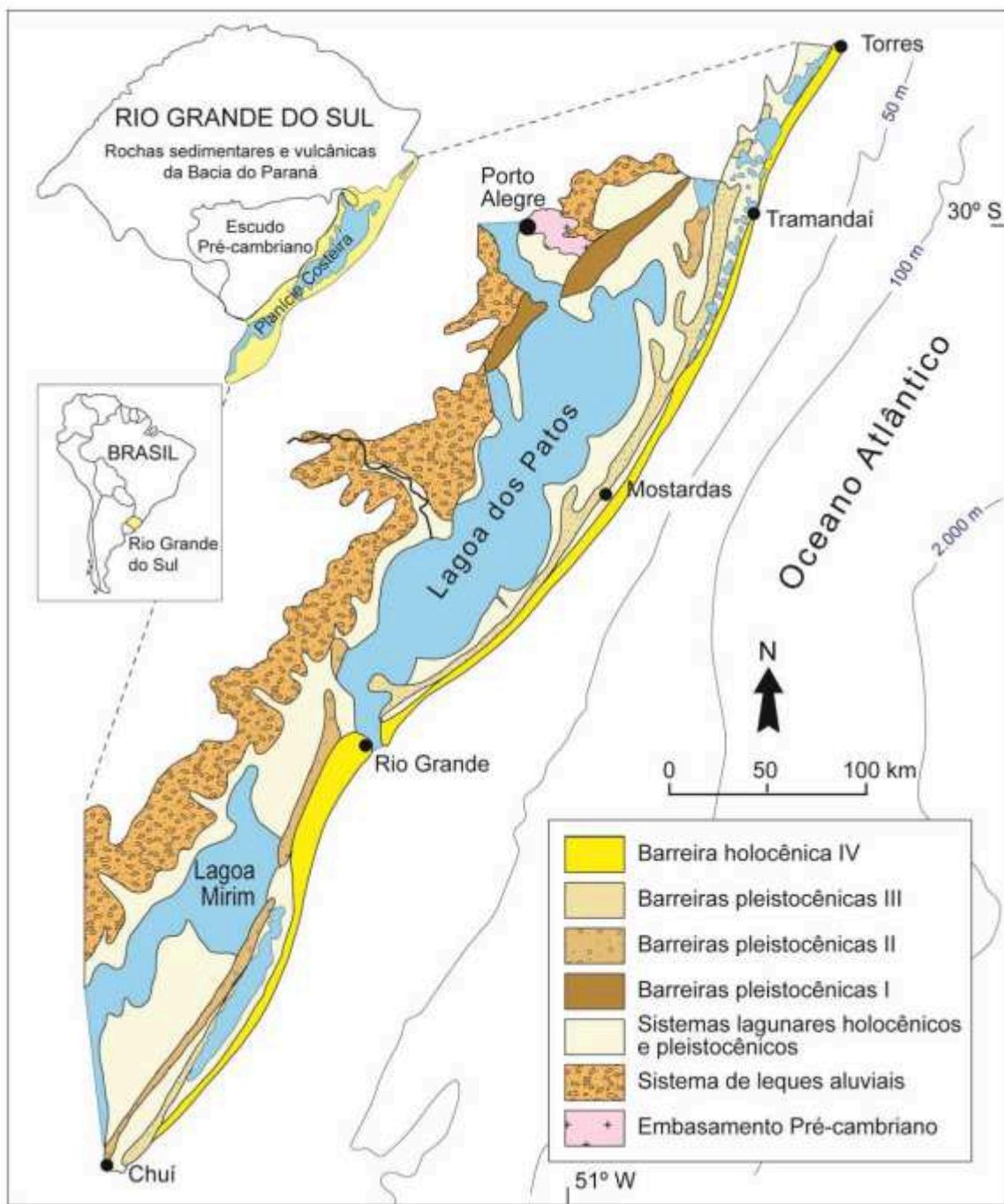


**Figura 18:** Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná com destaque para as Supersequências. Fonte: Milani (2004).

Por fim, a leste do Escudo-Rio-Grandense está presente a Província Costeira. Segundo Willwock (1984), a Província Costeira do Rio Grande do Sul é formada por dois domínios geológicos: o Embasamento e a Bacia de Pelotas. O domínio

referente ao Embasamento é formado pelo complexo cristalino pré-cambriano e pelas sequências sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná, sendo submetido a sucessivos basculamentos resultantes da abertura do oceano Atlântico-Sul. A Bacia de Pelotas (bacia marginal) está associada a essa dinâmica tectônica e foi abastecida por sedimentos clásticos provenientes de terrenos mais altos. A partir do Terciário, variações globais do nível do mar ocasionaram a acumulação de cascalhos, areias e lamas. A parte superior dessa sequência é atribuída a Planície do Rio Grande do Sul, formada por um conjunto de facies sedimentares atribuídas a ambientes continentais, transicionais e marinhos.

De acordo com Tomazelli & Willwock (2000), os depósitos sedimentares e as formas geomorfológicas da planície costeira estão relacionados a sistemas deposicionais de leques aluviais (na porção mais interna da planície) e a um complexo barreira-laguna, no qual sua formação condiz a quatro ciclos transgressivos-regressivos. Os sedimentos dos leques aluviais foram originados a partir das rochas ígneas e metamórficas do escudo cristalino e de rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná, sendo posteriormente retrabalhados pelos sistemas barreira-laguna. A Figura 19, retirada de Stevaux & Dillenburg (2011), foi modificada a partir de Tomazelli & Willwock (1996) e demonstra os quatro sistemas barreira-laguna (além da região que compreende o embasamento e os leques aluviais), sendo três sistemas de idade pleistocênica (I, II e III) e um de idade holocênica e ainda ativo (IV).



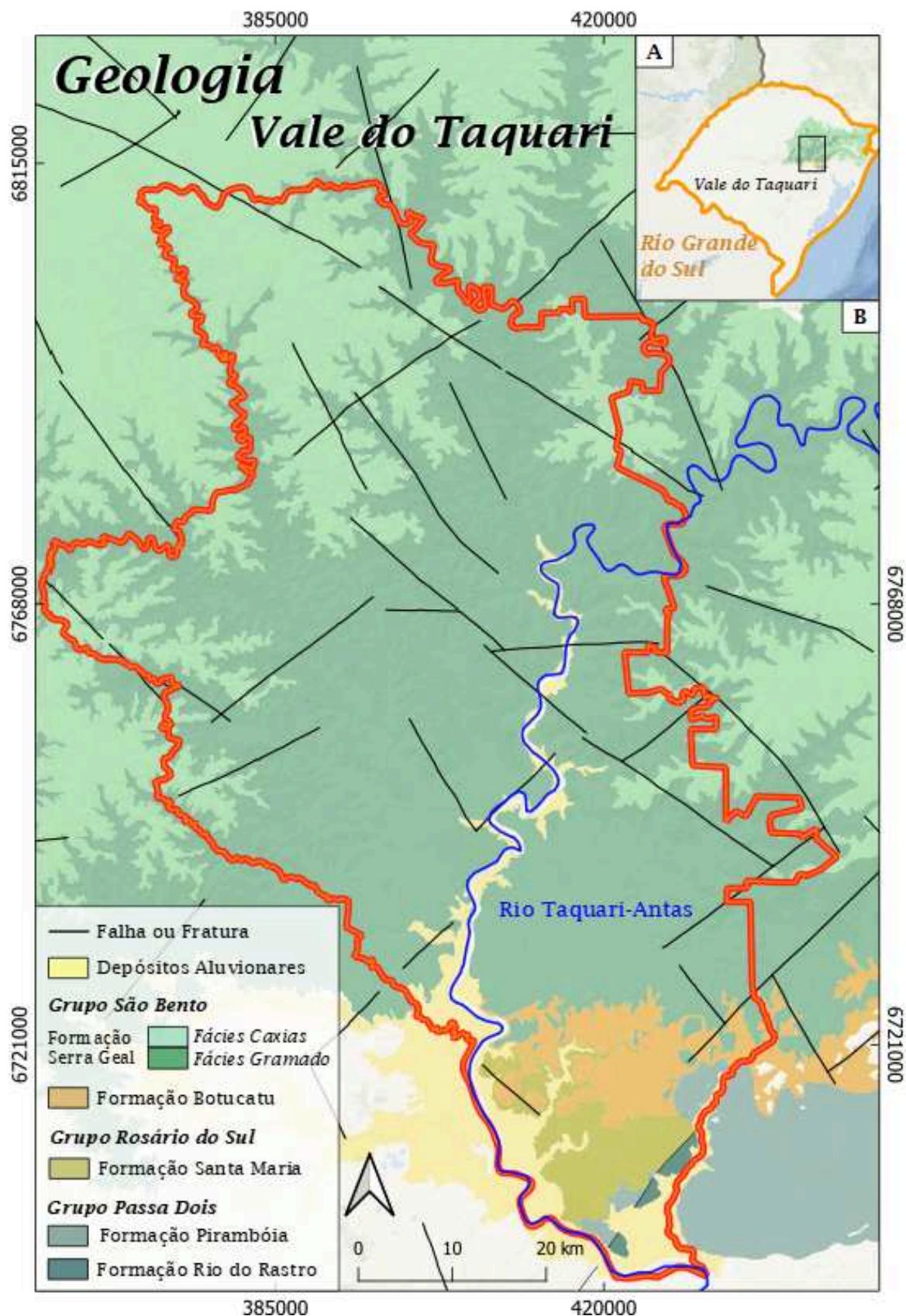
**Figura 19:** Geologia da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Modificado de Tomazelli & Willwock (1996). Fonte: Stevaux & Dillenburg (2011).

### 3.2 Geologia Local

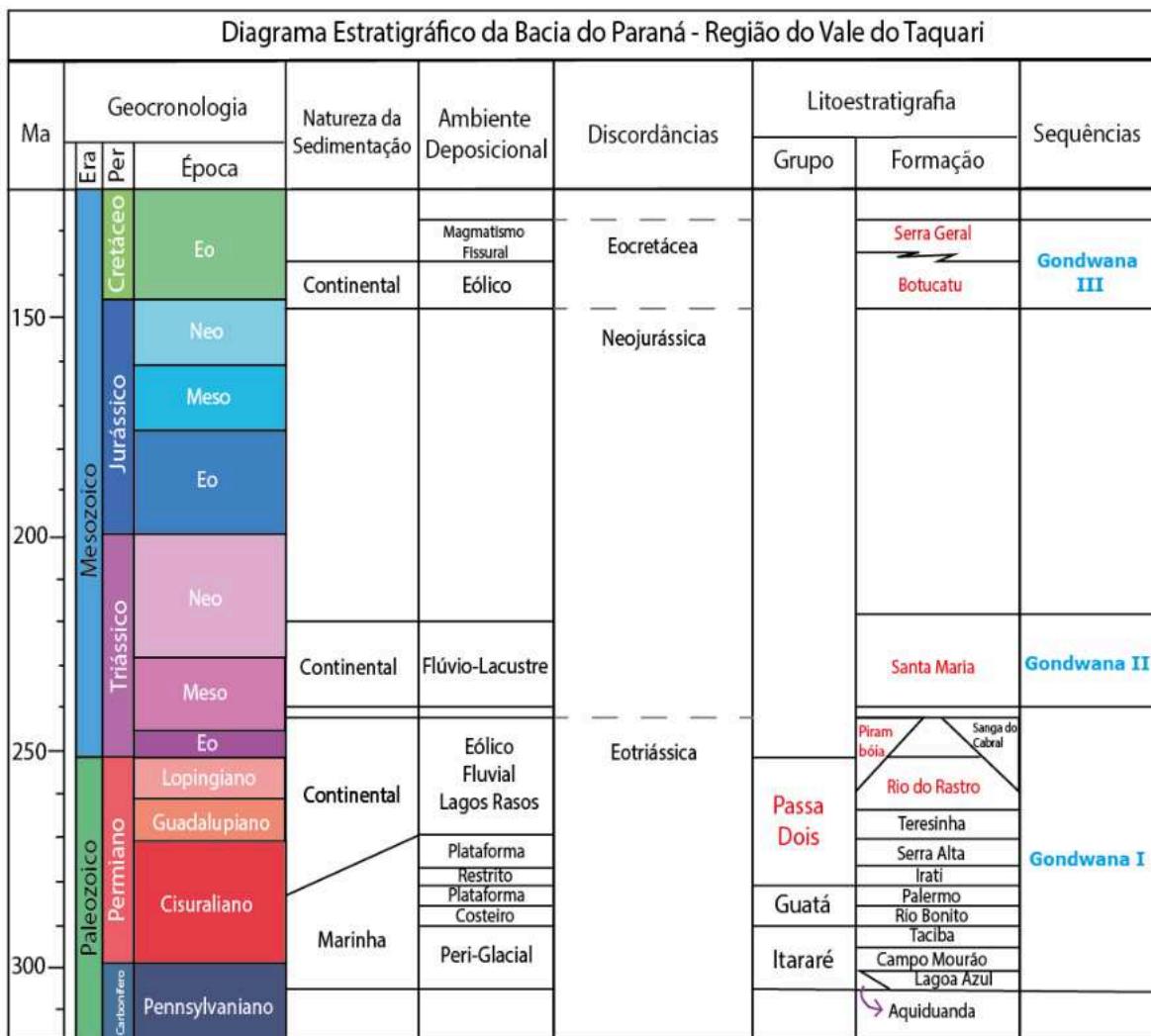
Com base no mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul, desenvolvido em escala 1:750.000 pelo Serviço Geológico do Brasil (Wildner *et al.*, 2008), a região do Vale do Taquari está integralmente disposta na Província Paraná, incorporando os grupos Passa Dois, Rosário do Sul e São Bento (Figura 20.B).

O Grupo Passa Dois é representado pelas formações Rio do Rastro e Pirambóia, sendo estes referentes a rochas sedimentares que consistem em, respectivamente, intercalações de argilitos e arenitos e camadas de arenitos, associados ao Permiano Superior. O Grupo Rosário do Sul é representado na região pela Formação Santa Maria, composta por arenitos, arenitos conglomeráticos e siltitos, de idade Triássica. Por fim, o Grupo São Bento inclui as formações Botucatu (arenitos finos a grossos associados ao Jurássico e Cretáceo) e Serra Geral (derrames vulcânicos continentais referentes ao Cretáceo). No Vale do Taquari, a Formação Serra Geral se subdivide entre a Fácies Gramado (derrame basáltico) e a Fácies Caxias (derrame de composição intermediária a ácida), sendo a Fácies Gramado predominante na região. A Figura 20 consiste na visão litológica e estrutural da região conforme a base de dados do Mapa Geológico do Rio Grande do Sul (Wildner *et al.*, 2008).

Já em termos de evolução geológica, pode-se dizer que o Vale do Taquari apresenta formações de idades que vão desde o Permiano Superior (Paleozóico), com o Grupo Passa Dois, até o Cretáceo (Mesozóico), com o Grupo São Bento. De acordo com o Diagrama Estratigráfico da Bacia do Paraná, proposto por (Milani *et al.*, 2007), a região perpassa pelas Supersequências Gondwana I, II e III. A imagem referente a Figura 21 é uma adaptação do diagrama desses autores, destacando os grupos e formações presentes na região do Vale do Taquari.



**Figura 20:** Contextualização geológica da região do Vale do Taquari. (A) Localização no estado do Rio Grande do Sul e (B) sua classificação litológica e arranjo estrutural. Fonte de dados: Wildner *et al.* (2008).



**Figura 21:** Diagrama estratigráfico da Bacia do Paraná modificado de Milani *et al* (2007) e destacando as formações presentes no Vale do Taquari (em vermelho), assim como as Supersequências Gondwana I, II e III.

De acordo com Milani *et al.* (2007) o Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), ao qual o Grupo Passa Dois se insere, apresenta o maior volume sedimentar da Bacia do Paraná, com uma espessura total de aproximadamente 2.500 metros. Esta supersequência se estabelece após uma extensa glaciação continental, derivada do fato de que a porção sul-ocidental encontrava-se em elevadas latitudes. Posteriormente, o paleocontinente migra para norte e inicia-se uma fase de degelo, reconfigurando a dinâmica sedimentar ao final do Carbonífero e marcando o início da Supersequência Gondwana I.

Nesse contexto, o Grupo Passa Dois se estabelece ao final da supersequência, sendo a Formação Rio do Rastro associada a regressão do nível

do mar após a Formação Teresinha, fazendo com que sistemas continentais passassem a dominar a bacia (Milani *et al.*, 2007). Assim, a sedimentação anteriormente associada à ação de marés é substituída por um complexo progradacional de red beds, com presença de lobos deltaicos, pelitos lacustres, arenitos eólicos e depósitos fluviais da Formação Rio do Rasto, estando presente no sul da região do Vale do Taquari. A Formação Pirambóia, também presente na porção sul do vale e condizente com a supersequência em questão, consiste em arenitos de granulometria fina a média, de geometria lenticular bem desenvolvida, estando associado a ambiente eólico com intercalações fluviais (Wildner *et al.*, 2008).

O Grupo Rosário do Sul, representado pela Formação Santa Maria no Vale do Taquari, é condizente com A Supersequência Gondwana II, de acordo com a proposta de Milani *et al.* (2007). Essa supersequência é interpretada como sendo referente ao desenvolvimento de grábens distensivos assimétricos no meso-neotriássico, em que drenagens se acomodaram sob a rampa flexural deste sistema, enquanto que nas porções de maior subsidência foram se formando ambientes lacustres (Milani *et al.*, 2007).

Neste pacote, observam-se intercalações de argilitos e siltitos lacustres com arenitos fluviais, possivelmente em resposta a variações do nível de base do lago, ocasionado por influência tectônica e climática (Milani *et al.* 1998). A Formação Santa Maria está associada a depósitos de canais fluviais de moderada sinuosidade, de planície de inundação e lacustre, sendo composta por arenitos e arenitos conglomeráticos intercalados com argilitos e folhelho subordinados, assim como siltito argiloso maciço (Wildner *et al.*, 2008).

Por fim, a Supersequência Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) tem grande distribuição pela Bacia do Paraná, compreendendo o intervalo correspondente a Formação Botucatu e Formação Serra Geral (Milani *et al.*, 2007) no contexto do Vale do Taquari do Grupo São Bento. Esse intervalo é representado, em termos geotectônicos, pela pré-ruptura do supercontinente no Mesozoico, caracterizado por ampla desertificação, que favoreceu a predominância da formação de depósitos eólicos da Formação Botucatu, relacionados a arenitos quartzosos de granulometria fina a média e marcados por estratificações cruzadas de grande escala. Ao topo unidade, os arenitos são intercalados com os primeiros derrames de lava, que marcam os estágios iniciais da ruptura do Gondwana, caracterizando o

início da origem da Formação Serra Geral (Milani & Ramos, 1988).

A Formação Serra Geral está relacionado ao Magmatismo Serra Geral, um amplo e intenso vulcanismo fissural não-oceânico datado do Mesozóico, afetando a Bacia do Paraná a partir de derrames, rede de diques que cortam a seção sedimentar e soleiras alojadas em planos de estratificação sedimentares (Milani *et al.*, 2007). Em relação a sua composição, Peate; Hawkesworth; Mantovani, (1992) indicam que, petrologicamente, o evento gerou basaltos toleíticos e andesitos basálticos, ocorrendo subordinadas quantidades de riolitos e riódacitos (Milani *et al.*, 2007).

De acordo com o Mapa Geológico do Rio Grande do Sul (Wildner *et al.*, 2008), a Formação Serra Geral no Vale do Taquari se manifesta a partir de duas fácies distintas, uma mais antiga e que recobre maior parte da região, chamada Fácies Gramado (132,4 +- 1,4 Ma, pelo método Ar-Ar), e uma mais nova, localizada a norte e intersectando com os limites do vale, chamada Fácies Caxias (132,3 +- 0.5 Ma, segundo o método Ar-Ar). A Fácies Gramado está relacionada a derrames basálticos granulares finos a médio, com horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilitas e saponita, apresentando intercalações com os arenitos Botucatu. Já a Fácies Caxias refere-se a derrames de composição intermediária a ácida, riódacitos a riolitos, com vesículas preenchidas em sua maioria por calcedônia e ágata, associadas a mineralizações.

Além das formações apresentadas, a região do Vale do Taquari apresenta depósitos aluviais, formados por areia de granulometria fina a grossa, cascalho e sedimentos siltítico-argiloso, em calhas de rio e planícies de inundação (Wildner *et al.*, 2008).

Em relação ao arcabouço estrutural, pode-se dizer que a região apresenta o cenário característico da Bacia do Paraná, que é marcada pela predominância de lineamentos com direções preferenciais NW-SE, NE-SW e E-W. Estes lineamentos correspondem a sistemas de fraturas e falhas proterozoicas reativadas, as quais são amplamente observadas no Vale do Taquari. Em particular, as fraturas orientadas em NW-SE atuaram como dutos preferenciais para eventos intrusivos e extrusivos, sendo comumente preenchidas por diques de diabásio. Além disso, secundariamente, a bacia apresenta lineamentos com direção E-W, possivelmente associados a fragmentação do Gondwana (Zalán *et al.*, 1990, v. 51; Morelatto, 2017).

## 4. HISTÓRICO E IMPACTO DAS ENCHENTES NO RIO GRANDE DO SUL

### 4.1 Histórico das Enchentes

Os desastres naturais no Brasil estão majoritariamente associados à dinâmica externa da Terra, sendo as inundações um dos eventos mais recorrentes e impactantes (Tominga *et al.*, 2009). Esses eventos costumam ocorrer durante períodos de chuvas intensas e prolongadas, quando os sistemas atmosféricos atuam de forma persistente sobre determinadas regiões. O agravamento das enchentes, especialmente em áreas urbanas, está diretamente relacionado à ação antrópica sobre o ambiente, como a impermeabilização do solo, o assoreamento de corpos hídricos e a ocupação desordenada das planícies de inundaçāo (Tavares & Silva, 2008). Mesmo em locais com topografia favorável à infiltração, como terrenos planos, essas intervenções humanas têm potencializado os efeitos das cheias, tornando a necessidade de revisitar o planejamento territorial.

No Rio Grande do Sul, o histórico de enchentes severas tem se tornado cada vez mais preocupante, com impactos que se estendem às esferas social, ambiental e econômica. De acordo com Kreutz *et al.* (2023), há registros históricos que documentam os efeitos devastadores das cheias no Vale do Taquari desde o século XIX, como os episódios marcantes de 1873 e 1941. Esses eventos, que continuam a se repetir na atualidade, causam prejuízos significativos à infraestrutura, à economia local e à qualidade de vida da população, além de provocarem danos aos ecossistemas. Ademais, o aumento da frequência e intensidade dessas inundações revelam a vulnerabilidade de certas regiões frente a eventos extremos, intensificados pelas mudanças climáticas e pela intervenção antrópica sobre o local.

Este capítulo apresenta uma síntese dos eventos de enchente mais recentes no estado, com ênfase nas ocorrências de 2020, 2023, 2024 e 2025 no Vale do Taquari. A análise busca contextualizar esses eventos no cenário das mudanças climáticas globais, discutindo os fatores envolvidos em sua intensificação e a urgência da implementação de medidas de resiliência nos territórios afetados.

### 4.2 Enchentes de 2020

As enchentes que atingiram o Rio Grande do Sul em julho de 2020 configuraram-se como o evento climático-hidrológico extremo mais significativo ocorrido na região Sul do Brasil naquele ano. O episódio foi precedido por um

período de estiagem de seis meses, que afetou a maioria das bacias hidrográficas do estado, resultando na decretação de Situação de Emergência em 408 dos 497 municípios gaúchos. Entre novembro de 2019 e maio de 2020, as chuvas foram escassas e irregulares, permanecendo abaixo da média até o final de maio, em que o regime de precipitação foi influenciado pelo retorno das frentes frias (Giacomelli *et al.*, 2021).

O evento extremo de julho impactou de forma mais expressiva as bacias dos rios Taquari-Antas e Caí. No caso do Rio Taquari, as chuvas mais intensas ocorreram entre os dias 8 e 9 de julho, provocando elevação significativa de seu nível. Os municípios de Muçum, Encantado, Roca Sales e Arroio do Meio estão entre os que foram mais atingidos, sendo que em Muçum o nível do rio alcançou a cota de 22 metros no dia 8 de julho, o maior valor já registrado na estação de monitoramento operada pela CPRM desde 1940. Na estação de Estrela, o nível chegou a 27,4 metros no dia seguinte, configurando-se como o terceiro maior registro da série histórica, ficando atrás apenas das cheias de 1941 e 1956 (Moraes *et al.*, 2023; Giacomelli *et al.*, 2021).

De acordo com informações de 25 estações pluviométricas instaladas na Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas, a inundação do dia 9 de julho foi precedida por uma precipitação acumulada de 210,4 mm em 72 horas, com uma precipitação média acumulada de 116,5 mm no dia anterior da inundação. Em 240 horas, que representam 10 dias antes da inundação, a precipitação média acumulada correspondeu a 337,3 mm (Moraes *et al.*, 2023).

Em particular, Bruski; Tognoli; Araujo (2020) relatam que todas as estações presentes em Encantado registraram precipitações nos dois dias que antecederam a enchente, embora os volumes tenham se mantido abaixo dos 30 mm. No entanto, um pico registrado por volta das 23h30 do dia 7 de julho mudou esse cenário, quando o marco de 77,6 mm foi alcançado. No que diz respeito ao monitoramento do Rio Taquari, seu nível subiu rapidamente: de 5 metros no dia 6 de julho, passou para 9 metros no dia 7 e ultrapassou os 12 metros entre os dias 7 e 8, excedendo a cota de inundação. Os autores também destacam que houve uma falha no Sistema de Alerta de Cheias (SACE), responsável em grande parte por comprometer a possibilidade de resposta antecipada da Defesa Civil e de outros órgãos competentes, dificultando a implementação de medidas preventivas e mitigadoras.

Como forma de visualizar o impacto do evento extremo de 2020, a Figura 22

reúne registros fotográficos que refletem a situação nos municípios de Encantado, Arroio do Meio e Muçum.



**Figura 22:** Compilado de imagens do evento de julho de 2020, para os municípios de Encantado, Arroio do Meio e Muçum. Fonte: modificado de Moraes *et al.* (2023).

#### 4.3 Enchentes de 2023

Segundo o Instituto Humanitas Unisinos (IHU, 2024), o Brasil foi marcado por uma série de eventos climáticos atípicos no ano de 2023, sendo registrados 12 eventos principais (nove foram classificados como incomuns e dois como sem precedentes). No Rio Grande do Sul, o episódio mais crítico ocorreu entre os dias 1 e 7 de setembro, quando um evento extremo de precipitação desencadeou grandes inundações, sendo considerado na época o desastre mais severo no estado nas últimas quatro décadas. Segundo Alvalá *et al.* (2024), o episódio resultou em 54 mortes, mais de 400 mil pessoas afetadas, 943 feridos, mais de 5 mil desabrigados, cerca de 22 mil desalojados e 5 desaparecidos.

Pode-se dizer que a maioria dos municípios impactados localiza-se nas

regiões norte e central do estado, com destaque para o maior número de óbitos ocorridos na Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas, onde se encontra o Vale do Taquari. Muitas dessas localidades têm menos de 5 mil habitantes e apresentam forte dependência da agricultura. De acordo com o Atlas Digital de Desastres no Brasil (Sedec, 2025), entre 1991 e 2022, esses municípios contabilizaram 1.672 desastres naturais, sendo cerca de 69% relacionados a eventos hidrometeorológicos (Alvalá *et al.*, 2024).

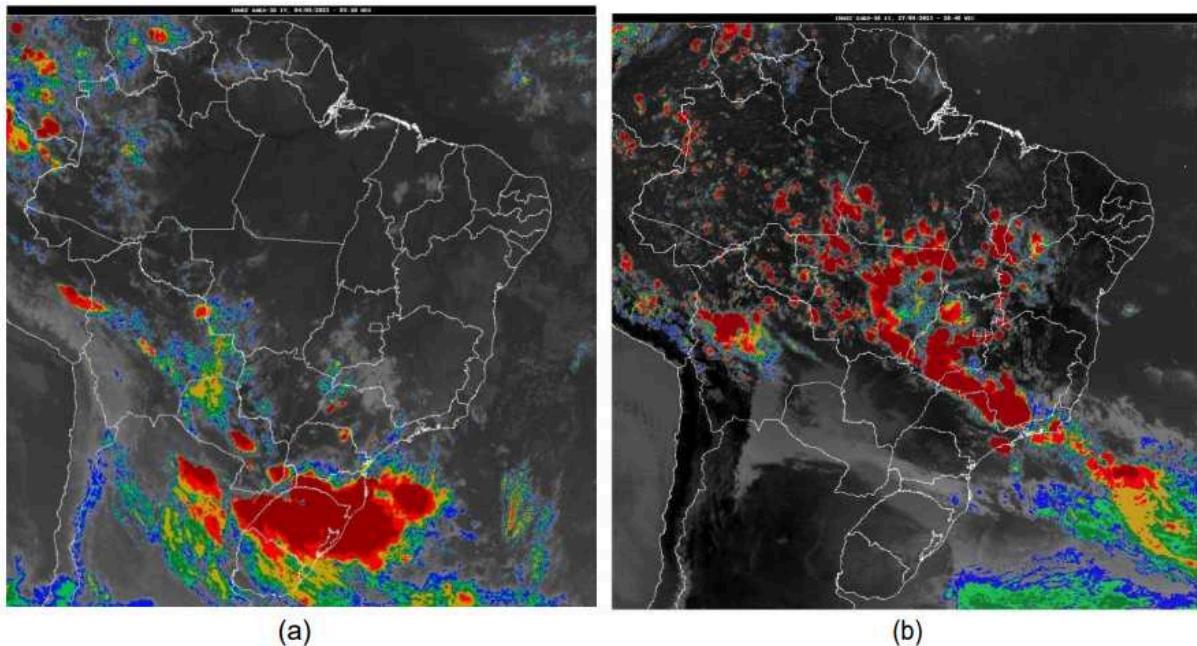
Em nota técnica para o mês de setembro, o INMET esclareceu que a chuva ocorrida na Região Sul foi resultado de uma combinação de sistemas meteorológicos, caracterizados por frentes frias, baixas pressões e ciclones extratropicais, juntamente com os efeitos do fenômeno El Niño. A tabela abaixo (Tabela 1) foi apresentada nessa nota, e indica a precipitação total acumulada em setembro para alguns dos municípios do estado do Rio Grande do Sul (INMET, 2023).

MUNÍCIPIOS	Total de chuva (mm) Setembro/2023	Média – Normal Climatológica(mm) Setembro	Desvio de chuva em (mm) Setembro/2023
Caçapava do Sul*	680,6	176,6	504,0
São Gabriel*	546,4	148,4	398,0
Cruz Alta	507,1	162,5	344,6
Passo Fundo	498,0	165,5	332,5
Santa Maria	482,1	155,3	326,8
Porto Alegre	447,3	266,0	299,5

\*Estação Meteorologia Automática

**Tabela 01:** Precipitação acumulada em setembro de 2023 no Rio Grande do Sul para municípios críticos. Fonte: (INMET, 2023).

Além disso, a Figura 23, também retirada da mesma nota técnica (INMET, 2023), apresenta, respectivamente, as imagens de satélite referente aos dias 04/09/2023 (às 0h10min pelo horário de Brasília) e 27/09/2023 (às 18:40 pelo horário de Brasília). As áreas em vermelho indicam regiões mais favoráveis à ocorrência de chuvas intensas.



**Figura 23:** Imagens de satélite para o território nacional referente aos dias 04/09/2023 (às 0h10min pelo horário de Brasília) em (A) e 27/09/2023 (às 18:40 pelo horário de Brasília) em (B). As áreas em vermelho indicam chuvas mais expressivas na Região Sul, demonstrando a gravidade nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina para o dia 4 de setembro. Fonte: (INMET, 2023).

De acordo com Alvalá *et al.* (2024), foi registrado níveis críticos em vários postos de monitoramento ao longo do Rio Taquari. No município de Muçum, o nível do rio chegou a 21,79 metros às 19h30 do dia 4 de setembro, ultrapassando em cerca de 4 metros a cota de inundação. Entretanto, a simulação hidrodinâmica estimou o pico da cheia em 26 metros, valor correspondente a um tempo de recorrência de 125 anos.

Além disso, durante o evento extremo, as estações em Muçum, Encantado e Estrela (localizados no Vale do Taquari) deixaram de registrar os níveis máximos em razão da submersão dos instrumentos. Em Encantado, os registros foram interrompidos quando o nível alcançou 20,73 metros, associado a uma recorrência de 37 anos. Em Estrela, os dados cessaram ao se atingir 27,20 metros, aproximadamente 8 metros acima da cota de inundação. Por fim, no município de Bom Retiro do Sul, o nível do rio aumentou mais de 18 metros entre os dias 3 e 5 de setembro. Contudo, até o dia 8, os níveis já haviam recuado para cerca de 7 metros, situando-se 2 metros abaixo do nível de alerta (Alvalá *et al.*, 2024).

A imagem abaixo (Figura 24), apresenta um compilado de registros

fotográficos referentes ao evento de setembro de 2023, compilados e apresentados pela UNIVATES (Freitas *et al.*, 2025).



**Figura 24:** Mosaico de registros fotográficos de municípios pertencentes ao Vale do Taquari em meio a tragédia de setembro de 2023. Fonte: modificado de Freitas *et al.* (2025).

#### 4.4 Enchentes de 2024

As inundações que atingiram o estado do Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024 configuram-se como um dos eventos hidrometeorológicos mais devastadores da história recente do Brasil, sendo considerado por Marengo *et al.* (2024) como o maior desastre climático do país. Segundo as estatísticas colhidas pela Defesa Civil e divulgadas no dia 17 de maio, 461 municípios foram afetados, levando a 154 óbitos, 806 feridos e 540.188 desalojados (Defesa Civil, 2024). Em relação às perdas econômicas, o Banco Interamericano de Desenvolvimento Suarez; Bello; Campbell (2024), afirmou que os prejuízos chegaram a 89 bilhões.

De acordo com Ferrer *et al.* (2025), a tragédia foi caracterizada por uma combinação de distintos processos físicos, incluindo movimentos de massa em áreas serranas e enxurradas intensas por rios que ligam regiões elevadas às planícies, além de inundações prolongadas em zonas densamente povoadas

(especialmente ao longo dos rios de planície e na região da Laguna dos Patos). A gravidade do evento foi ampliada por falhas nos sistemas de contenção e proteção contra cheias, o que potencializou os danos materiais e sociais. Estima-se que mais de 15.000 km<sup>2</sup> de áreas planas distribuídas ao longo dos principais cursos d'água do estado tenham sido inundadas.

Segundo Marengo *et al.* (2024), o evento climático extremo que atingiu o Rio Grande do Sul em 2024 resultou de uma combinação de fatores atmosféricos e oceânicos, que favoreceram a formação de chuvas intensas e prolongadas. O principal mecanismo associado foi um intenso fluxo de umidade originado principalmente no Oceano Atlântico Tropical, onde a temperatura da água está acima da média, acentuando processo de evaporação e aumentando a quantidade de vapor d'água disponível na atmosfera.

Posteriormente, essa extensa massa de ar úmido avançou para o interior do Brasil pelas regiões Norte e Nordeste, intensificando-se ainda mais ao atravessar a Amazônia, onde foi enriquecida pela elevada taxa de evapotranspiração da floresta. Ao prosseguir em direção ao sul do país, encontrou a barreira orográfica imposta pela Cordilheira dos Andes, que provocou o desvio e aceleração do fluxo em direção à região Sul. Nesse ponto, o ar quente e úmido foi de encontro a uma massa de ar frio, o que favoreceu sua ascensão na atmosfera e resultou na formação de nuvens densas e tempestades intensas (Marengo *et al.*, 2024).

Adicionalmente, a presença de um bloqueio atmosférico no Oceano Pacífico Sul dificultou a propagação de ondas que normalmente conduziriam o ar frio em direção ao norte, favorecendo, assim, a persistência das condições instáveis no Sul do Brasil. Somado a isso, os efeitos residuais do El Niño 2023–2024 (ainda presente, embora em fase de enfraquecimento) intensificaram a atuação da corrente de jato, uma anomalia caracterizada por ventos intensos a aproximadamente 10 km de altitude (Marengo *et al.*, 2024).

Portanto, a combinação desses fatores resultou em uma sucessão de tempestades intensas que provocaram volumes excepcionais de precipitação sobre amplas áreas do estado, culminando em inundações catastróficas e impactos socioambientais no Rio Grande do Sul. Na imagem abaixo (Figura 25) encontra-se a esquematização dos processos meteorológicos que desencadearam o evento climático extremo de 2024, divididos em cinco fases, retirado de Ferrer; Danéris; Marques (2025).



**Figura 25:** Contextualização meteorológica. A umidade originada no Oceano Atlântico Tropical (1) foi levada pelos ventos alísios para as regiões norte e nordeste do Brasil, agregando umidade ao transpassar pela Floresta Amazônica (2). Os ventos conduziram-na para o sul, onde se formou um corredor de umidade (3) entre um centro de alta pressão (4) estacionado na região Sudeste do Brasil e uma frente fria (5). Fonte: Ferrer *et al.* (2025).

De acordo com Ferrer; Danérис; Marques (2025) além dos condicionantes meteorológicos, outros fatores contribuíram para agravar os impactos socioambientais da catástrofe. São eles:

- (1) O contexto geológico, geomorfológico e hidrográfico: as chuvas mais intensas se concentraram nas áreas elevadas do Planalto Meridional, onde nascem os principais rios da Região Hidrográfica do Lago Guaíba. A partir dessas altitudes, a água escoou rapidamente por vales profundos e estreitos (como nos casos dos rios Taquari-Antas, Caí, Sinos e Gravataí), gerando fluxos torrenciais que atingiram velocidades elevadas, onde o nível d'água chegou a atingir 30 metros em alguns locais. Esses rios desaguam nas terras baixas da Depressão Periférica e, posteriormente, no sistema lagunar do Guaíba e da Laguna dos Patos. No entanto, em condições severas, como as vivenciadas

no evento, marés de tempestade impediram o escoamento para o mar, fazendo com que as águas se acumulassem na região deltaica do delta do Jacuí, formando um vasto lago de inundação de cerca de 800 km<sup>2</sup>. Essa dinâmica agravou os impactos em áreas densamente povoadas, especialmente na Região Metropolitana de Porto Alegre, afetando mais de quatro milhões de pessoas. Além disso, os fluxos carregados com sedimentos e material oriundo da erosão e deslizamentos nas encostas ampliaram os danos, com capacidade destrutiva suficiente para arrasar cidades inteiras, como ocorreu em Arroio do Meio.

- (2) Serviços ecossistêmicos e o escoamento da água: esse fator diz respeito às condições em que a água escoa sob a superfície, desde as cabeceiras até a desembocadura dos rios. Pode-se dizer que, de acordo com a dinâmica hídrica natural, elementos como matas ripárias e campos naturais atuam na regulação do escoamento hídrico, diminuindo a velocidade e o volume da água, além de favorecerem sua infiltração no solo. No entanto, nas últimas duas décadas, a intensificação da monocultura, especialmente da soja, levou à supressão desses serviços, agravada pelo enfraquecimento das leis ambientais e pela desestruturação de órgãos de gestão como a SEMA e a SMAM, que foram e incorporadas em outras secretarias. Paralelamente, o crescimento urbano avançou sobre áreas ribeirinhas e alagadiças, impulsionado pelo afrouxamento das medidas de proteção nos planos diretores. Como resultado, o solo perdeu significativamente capacidade de retenção hídrica e a população tornou-se mais exposta aos riscos de inundação. Um planejamento territorial adequado, com preservação dos ecossistemas naturais, teria sido essencial para mitigar esses efeitos.
- (3) Infraestrutura e a inteligência do Estado para enfrentar desastres: constituiu um dos principais fatores que agravaram os impactos da catástrofe no Rio Grande do Sul. Um exemplo emblemático foi o colapso do sistema de proteção contra inundações de Porto Alegre, composto por 68 km de diques e 24 casas de bombas, que falharam devido à falta de manutenção das comportas. Além disso, o processo de sucateamento e posterior privatização da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), somado à extinção de órgãos estratégicos como a Fundação Zoobotânica e a Fundação de Economia e Estatística, enfraqueceu a governança e desarticulou núcleos de

inteligência fundamentais para o planejamento e a resposta eficiente a eventos extremos. Como consequência, a gestão do desastre foi comprometida e insuficiente diante da magnitude do evento.

(4) Defesa Civil, planos de preparação e gestão de emergências: a atuação da Defesa Civil e os planos de preparação e gestão da emergência representaram um ponto crítico na resposta ao desastre, revelando fragilidades significativas. Apesar dos esforços evidentes de resgate e salvamento, a gestão da crise ficou praticamente restrita ao socorrista, já que o sistema de alertas e a preparação preventiva falharam. Inundações como as que ocorreram em 2015 e 2023 já haviam sinalizado a necessidade de aprimoramento das estratégias de prevenção, e o conhecimento necessário está disponível tanto em centros de pesquisa quanto em experiências bem-sucedidas de defesa civil no país. Complementarmente, a ausência de uma cultura de educação para emergências climáticas agravou os impactos, evidenciando a importância de incluir, nos currículos escolares e universitários, conteúdos sobre geografia, geologia e mudanças ambientais, com foco no território vívido. A construção de uma inteligência social e educativa voltada à emergência climática torna-se urgente, com programas de extensão que incentivem a ciência cidadã, fortaleçam a percepção de risco e apoiem comunidades na identificação de suas vulnerabilidades.

Assim, diante da análise integrada dos fatores que contribuíram para a tragédia no Rio Grande do Sul em 2024, evidencia-se que o desastre não foi resultado apenas de condições climáticas extremas, mas também da combinação de características fisiográficas e fragilidades institucionais. Dessa forma, os padrões meteorológicos anômalos foram agravados por condicionantes do meio físico, da supressão de serviços ecossistêmicos, da falha na infraestrutura, da ausência de planejamento urbano adequado e da fragilidade dos sistemas de gestão e educação ambiental, potencializando os impactos da catástrofe para além do comportamento climático. A imagem abaixo é um compilado de registros fotográficos de diferentes municípios durante o mês de maio, modificado de Freitas *et al.* (2025)



**Figura 26:** Mosaico de imagens apresentando municípios pertencentes ao Vale do Taquari em meio ao ECE 2024. Fontes: modificado de Freitas *et al.* (2025).

No que diz respeito aos impactos socioespaciais em cidades de menor porte, como nos municípios do Vale do Taquari, observou-se o início das chuvas intensas entre os dias 28 e 30 de abril, provocando quedas de barreiras em diversos municípios, como resultado do encharcamento do solo e da elevada pluviosidade.

No dia 30 de abril, cidades como Marques de Souza e Travesseiro, localizadas às margens do Rio Forqueta, registraram volumes superiores a 150 mm de chuva em curto intervalo de tempo. O transbordamento de arroios invadiu áreas urbanas em Forquetinha e Progresso, evidenciando a fragilidade da drenagem no local. Na parte alta da região, as chuvas intensas nas cabeceiras do Rio das Antas, especialmente em Santa Tereza, provocaram uma rápida elevação do nível do Rio Taquari, que passou a subir de forma alarmante em direção ao seu curso médio e inferior (Detoni *et al.*, 2024; Souza, 2024).

Na cidade de Roca Sales, o Rio Taquari chegou a subir mais de um metro por hora, enquanto em Lajeado as chuvas atingiram quase 190 mm em apenas 24 horas, fazendo com que o rio transbordasse e alcançasse 27 metros durante a

madrugada (Souza, 2024). Ainda no dia 30 foram divulgadas as primeiras fatalidades, com o registro de dois óbitos na região do Vale do Taquari (Detoni *et al.*, 2024).

Em 1º de maio, o nível do Rio Taquari continuou a subir em Lajeado, superando a marca histórica da cheia de 2023 e ultrapassando os 29,75 metros. Durante a tarde do dia seguinte (02/05), no mesmo município, o rio atingiu a marca de 33,35 metros, estabelecendo um novo recorde de cheia na cidade. Ademais, a força da correnteza do Rio Forqueta causou impactos diretos na infraestrutura regional, destruindo parcialmente a ponte da ERS-130 e a histórica Ponte de Ferro, ambas entre Lajeado e Arroio do Meio, além da ponte que conectava os municípios de Marques de Souza e Travesseiro (Detoni *et al.*, 2024).

Pode-se dizer que o município de Cruzeiro do Sul foi uma das regiões mais afetadas, com bairros como Passo de Estrela preservando poucas casas intactas. Na sexta-feira, 3 de maio, a chuva começou a perder força, mas as consequências da tragédia ficaram evidentes com o início das ações de desobstrução de vias e acessos. Diversas localidades, como Muçum, permaneceram isoladas por até três dias sem energia elétrica, sinal de telefone e internet (Souza, 2024).

Segundo os dados reunidos por Detoni *et al.*, (2024, 26.624 edificações foram afetadas no Vale do Taquari, com destaque para Marques de Souza, Muçum e Roca Sales, onde mais de 40% das áreas urbanas sofreram danos. Já em áreas rurais de municípios como Cruzeiro do Sul, Forquetinha e Muçum tiveram mais de 15% das edificações atingidas. Esse alto índice de destruição está ligado aos impactos das enxurradas, resultando em perdas humanas expressivas, com registros de 33 óbitos e 20 desaparecidos no Vale do Taquari, sendo 13 mortes em Roca Sales e 12 em Cruzeiro do Sul. A tabela abaixo (Tabela 02) apresentada por Detoni *et al.* (2024) reúne dados de instituições públicas e estudos anteriores acerca dos impactos infraestruturais e demográficos no Vale do Taquari em decorrência da tragédia de 2024.

Município	População total (2022)	Número de óbitos (18 maio 2024)	Número de desaparecidos (18 maio 2024)	Percentual de edificações inundadas em área rural	Percentual de edificações inundadas em área urbana
Marques de Souza	3.969	-	1	12,92	53,63
Muçum	4.601	-	-	16,76	50,66
Roca Sales	10.418	13	3	8,96	43,91
Cruzeiro do Sul	11.600	12	6	29,11	43,44
Estrela	32.183	1	1	11,03	40,24
Travessseiro	2.152	1	-	10,32	29,66
Encantado	22.962	1	2	12,33	25,81
Colinas	2.423	-	-	12,18	23,78
Arroio do Meio	21.958	-	1	7,32	20,07
Forquetinha	2.393	2	-	16,3	14,07
Lajeado	93.646	2	5	0	8,25
Relvado	1.796	1	1	1,27	0
Imigrante	3.080	-	-	0,88	0
Doutor Ricardo	1.888	-	-	1,44	0
Canudos do Vale	1.656	-	-	2,58	0

**Tabela 02:** Impactos infraestruturais e demográficos de municípios no Vale do Taquari em decorrência da tragédia de 2024. Fonte: Detoni *et al.* (2024).

#### 4.5 Enchentes de 2025

As enchentes de junho de 2025 configuram o ECE mais recente registrado no Rio Grande do Sul. Com duração aproximada de seis dias, o episódio ocorreu entre os dias 14 e 20 do mês de junho de 2025.

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025), grande parte da Região Sul apresentou volumes de precipitação superiores a 150 mm ao longo de junho. No entanto, os maiores acumulados foram registrados nas porções central e noroeste do RS, com destaque para a estação meteorológica de Santa Maria, que totalizou 424,6 mm de chuva. Esse volume representa mais do que o triplo da média histórica do mês, que é de 132,7 mm, evidenciando a intensidade do evento.

De acordo com o Governo do Estado do Rio Grande do Sul (Secom, 2025), em nota oficial publicada no dia 23 de junho, 132 municípios foram afetados pelos impactos das chuvas, com o registro de 6.258 pessoas desabrigadas e quatro óbitos confirmados. Na mesma data, o Rio Taquari apresentava tendência de estabilização, com os níveis em processo de declínio e retorno à normalidade. Pequenas elevações pontuais ainda foram observadas, atribuídas às precipitações das 24 horas anteriores.

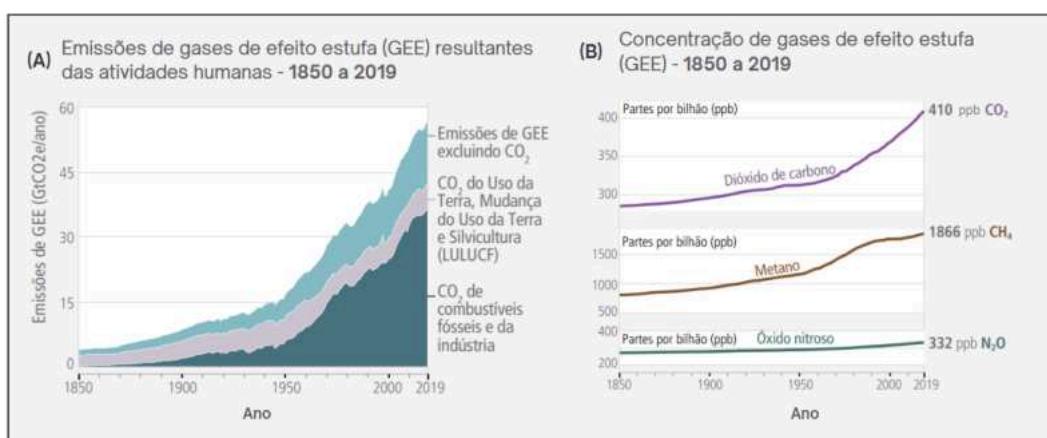
Diante desses dados, torna-se evidente que o evento de junho de 2025 reforça a tendência de intensificação e recorrência de episódios hidrometeorológicos

extremos no estado. Ademais, a magnitude dos volumes precipitados, somada à vulnerabilidade de diversas áreas urbanas e rurais, contribuiu para a ampliação dos impactos socioambientais ocorridos.

#### 4.6 Rio Grande do Sul: um cenário de mudanças climáticas e resiliência

As mudanças climáticas são reflexo de mais de um século de crescentes emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE), principalmente gás carbônico e metano, associados a um estilo de vida marcado por padrões insustentáveis de consumo e produção. Entre 2011 e 2020, a temperatura média da superfície global foi 1,1°C mais alta do que no período entre 1850 e 1900, influenciando em alterações rápidas e abrangentes na atmosfera, oceano, criosfera e biosfera. As mudanças causadas englobam danos substanciais e muitas vezes irreversíveis nos ecossistemas, além de contribuir para crises humanitárias onde as ameaças climáticas somam-se a alta vulnerabilidade social e econômica (Lee *et al.*, 2023).

A imagem abaixo (Figura 27) foi adaptada do IPCC (Lee *et al.*, 2023) e reflete o cenário de aumento da emissão dos gases de efeito estufa entre os anos de 1850 a 2019, destacando em (A) as emissões antropogênicas líquidas globais de GEE, envolvendo a queima de combustíveis fósseis e processos industriais; a gestão de uso e ocupação da terra e silvicultura; e a emissão de outros gases em menor quantidade, tais como  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e gases fluorados. Tais emissões contribuíram para o crescimento das concentrações anuais dos três principais GEE homogeneamente misturados:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , como mostrado em (B).



**Figura 27:** Representação gráfica das emissões de GEE resultantes das atividades humanas (A) e o comportamento da concentração anual dos três principais gases representantes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ), escalonados em três painéis. Intervalo entre 1850 e 2019. Fonte: modificado de Lee *et al.* (2023).

No que tange às consequências do aquecimento global aos fenômenos atmosféricos, destaca-se o aumento da ocorrência de eventos meteorológicos extremos em todas as regiões do mundo (Lee *et al.*, 2023). Casos atípicos como ondas de calor, precipitações severas, secas e ciclones tropicais estão entre as principais consequências da interferência antrópica no clima. Além disso, este mesmo fator contribuiu para o aumento da probabilidade de ocorrência de eventos extremos compostos desde a década de 1950, fazendo com que impactos e riscos para a saúde, ecossistemas, infraestrutura e meios de subsistência estejam mais vulneráveis a ameaças climáticas simultâneas e repetidas. Particularmente, no caso das chuvas intensas, as mudanças na precipitação em grande escala e na umidade da troposfera superior são observadas mais claramente desde 1979 (Lee *et al.*, 2023).

Como resposta às adversidades geradas pelas alterações climáticas, torna-se essencial o planejamento e a implementação de medidas eficazes de mitigação e adaptação, sustentadas por uma abordagem integrada e multiescalar. Neste processo, a governança climática assume um papel fundamental ao colaborar para definir objetivos e prioridades que integrem esta pauta nos diversos domínios e níveis políticos, considerando as circunstâncias nacionais e o contexto da cooperação internacional (Lee *et al.*, 2023). É nesse cenário que se insere a ação climática, entendida como o conjunto de estratégias e intervenções que visam reduzir os impactos dessas mudanças e promover a resiliência dos sistemas sociais e ecológicos. De acordo com o IPCC, a ação climática, quando incorporada numa estrutura de governança eficaz, fortalece a capacidade institucional de resposta aos desafios ao se alinhar com estruturas institucionais, leis e maior acesso ao financiamento e à tecnologia (Lee *et al.*, 2023).

No contexto brasileiro, o enfrentamento das alterações climáticas se baseia na articulação de compromissos nacionais e no envolvimento em processos internacionais de governança ambiental. A nível interno, destaca-se o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), que estabelece diretrizes para a mitigação das emissões de gases efeito estufa. Além disso, em março de 2025, o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima anunciou o início que visa estruturar 100 ações climáticas de alto impacto em 50 municípios. Nesta perspectiva, cada cidade contará com suporte técnico para desenvolver duas ações climáticas de grande impacto, sendo uma para mitigação e outra para adaptação. Na

região Sul do país, seis municípios foram selecionados, sendo cinco deles no Rio Grande do Sul (Caxias do Sul, Cruzeiro do Sul, Gravataí, Porto Alegre e São Leopoldo) e dos quais dois deles (Caxias do Sul e Cruzeiro do Sul) encontram-se no Vale do Taquari (MMA, 2025).

De maneira geral, a preocupação dos efeitos das mudanças climáticas no estado do Rio Grande do Sul está associada aos recursos hídricos nacionais, com foco em eventos hidrológicos extremos (Ferrer *et al.* 2025). De acordo com as simulações de Detoni *et al.* (2024), os impactos das alterações climáticas no ciclo hidrológico dentro do contexto brasileiro é expresso pelo aumento das precipitações intensas de curta duração em praticamente todo território nacional (como eventos de um dia), gerando a intensificação de cheias em bacias pequenas e alagamentos em áreas urbanas (Ferrer *et al.* 2025). Entretanto, a região Sul destaca-se com a maior projeção de aumento de cheias em rios de médio a grande porte, que levam a ocorrência de catástrofes como a de 2024. Além disso, esses eventos podem se tornar até 5 vezes mais frequentes, sendo esperado também o aumento de 20% da magnitude das vazões durante as cheias (Detoni *et al.*, 2024; Ferrer *et al.*, 2025).

Nesse contexto, torna-se essencial a aplicação de medidas que reduzam o impacto das inundações, podendo estas serem tanto estruturais quanto não estruturais (Ferrer *et al.*, 2025). Assim, exemplos de modificações estruturais que contribuem para atenuar as cheias envolvem medidas como ampliação de canais, criação diques e barragens (para controlar o nível d'água em áreas vulneráveis), dragagem de rios naturais, recomposição da cobertura vegetal e o controle da erosão do solo. Além disso, medidas não estruturais, isto é, que não alterem o sistema hidrológico, podem ser úteis complementarmente no sentido de adaptar o convívio da sociedade às cheias, propondo planos de contingência e previsão e alerta de cheias (Ferrer *et al.* 2025)

Em termos mais específicos, a situação de vulnerabilidade do Rio Grande do Sul a eventos hidrológicos extremos aciona a necessidade das instituições governamentais responsáveis conduzirem medidas de mitigação adaptação e resiliência, sendo essa demanda reforçada após a catástrofe de 2024. Como principal exemplo está o Plano Rio Grande, lançado em maio de 2024, englobando um conjunto de ações, projetos e programas que propõe medidas para recuperar e projetar o Rio Grande do Sul do futuro. Este plano incorpora ações de curto, médio e longo prazo, envolvendo as atitudes emergenciais e de reconstrução do estado

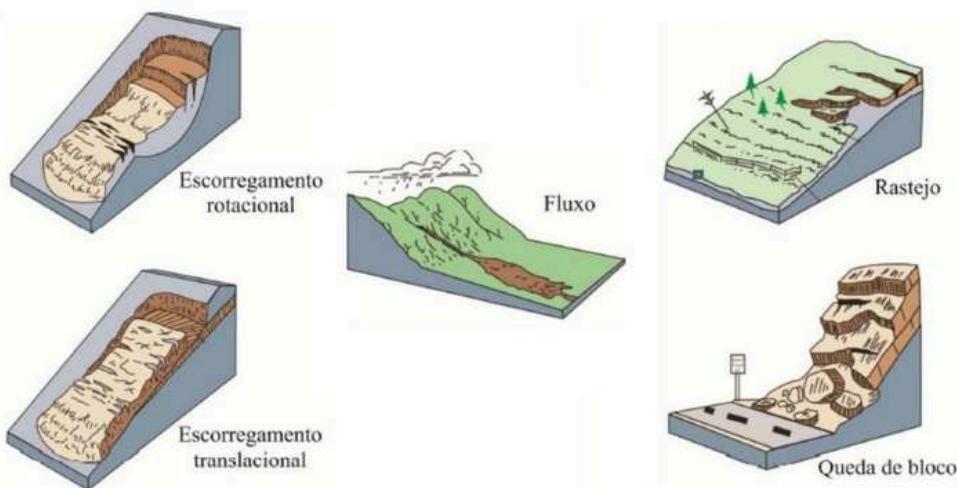
referentes à tragédia, assim como um conjunto de medidas do chamado Rio Grande do Sul do Futuro (Secretaria da Reconstrução Gaúcha, 2025).

Além das medidas governamentais, iniciativas acadêmicas também foram desenvolvidas, como é o caso do projeto (Re)Cria RS, promovido pela Faculdade de Arquitetura da UFRGS. Nesse caso, o objetivo consiste em unir, divulgar e articular ações de apoio ao estado do Rio Grande do Sul, seus municípios e populações atingidas, com foco na adaptação, reconstrução e reestruturação urbana e habitacional. O trabalho é desenvolvido com o apoio de voluntários, entre estudantes e docentes da arquitetura e urbanismo, além de colaboradores de outros cursos da UFRGS e pesquisadores externos, consolidando uma resposta técnica e solidária aos desafios impostos pela tragédia (FA, 2024).

## 5. MOVIMENTOS DE MASSA NO VALE DO TAQUARI (TRAGÉDIA DE 2024)

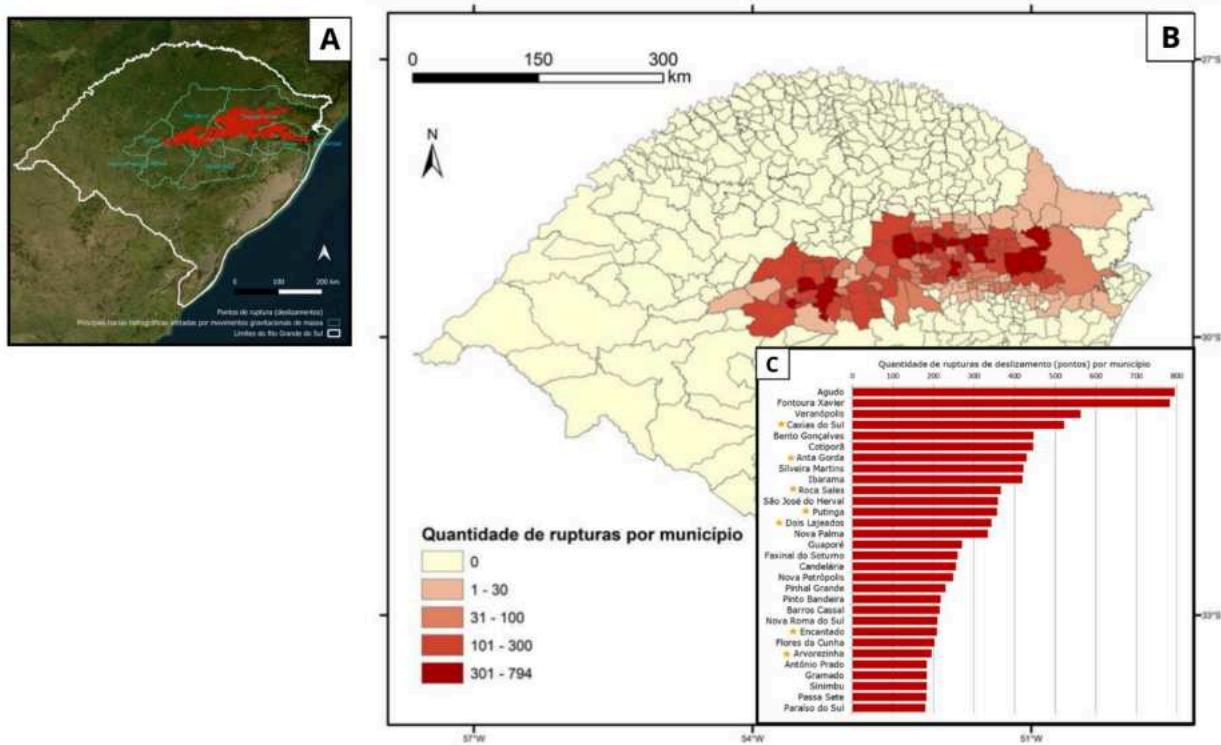
Os movimentos de massa são fenômenos geodinâmicos caracterizados por movimentos gravitacionais de solo ou material rochoso, desencadeados pela interação entre a força cisalhante e o atrito, isto é, quando a tração supera a resistência. Além disso, a mobilização do terreno pode ser desencadeada tanto por fatores naturais quanto por antrópicos, podendo estar associada a ambientes de predisposição à suscetibilidade erosiva, apesar dos mesmos não serem determinantes para a ocorrência do movimento de massa (SGB, 2014).

Dentro do estudo desses fenômenos existem padrões associados a natureza do movimento (Figura 28), condicionados pelo tipo de substrato e suas propriedades físicas e geométricas, assim como o contexto geomorfológico e os possíveis agentes endógenos e exógenos relacionados a essa mobilização. A depender do contexto da ocorrência do movimento de massa, estes podem ser danosos para o meio social, estando entre os principais tipos de desastres naturais definidos pelo CRED (*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*), associados por essa referência internacional como pertencentes a condicionantes geofísicas ou hidrológicas. Nesse caso, o primeiro relaciona-se apenas aos eventos originários da Terra sólida, enquanto o segundo refere-se à influência dos fenômenos hidrodinâmicos, como o ciclo da água (Below *et al.* 2009).



**Figura 28:** Cinco principais tipos de movimentos de massa segundo a USGS (2004), considerando que estes podem ser mistos. Fonte: Kobiyama *et al.* (2024).

No Brasil, os movimentos de massa são, em sua maioria, deflagrados pela interação entre a intensidade e a duração das precipitações, culminando em desastres hidrológicos, como o vivenciado no Rio Grande do Sul em maio de 2024 (Kobiyama, *et al.*, 2024). De acordo com a nota técnica publicada em julho de 2024 pelo SEI/MCTI (Cemaden, 2024), a Bacia Taquari-Antas foi identificada como uma das regiões mais severamente afetadas por movimentos de massa durante o evento extremo. Do total de 9.175 hectares mapeados com ocorrências desse tipo, aproximadamente 6.276 hectares encontram-se dentro da delimitação da bacia. A Figura 29 ilustra esse cenário, em que: no painel (A), observa-se o mapa da região, com pontos vermelhos representando a distribuição dos focos de ruptura identificados; o painel (B) apresenta o número de deslizamentos por município, utilizando uma escala de cor em que regiões com maior densidade apresentam tonalidades mais escuras; já o painel (C) destaca os 30 municípios mais afetados, dispostos graficamente, com estrelas amarelas indicando aqueles pertencentes à região do Vale do Taquari.



**Figura 29:** Panorama do contexto dos movimentos de massa segundo a nota técnica SEI/MCTI. O painel (A) apresenta o mapa da região analisada, com os pontos em vermelho indicando a distribuição dos focos de ruptura identificados. No painel (B), visualiza-se a quantidade de rupturas por município, evidenciando as áreas com maior incidência em cores progressivamente mais escuras. O painel (C) destaca os 30 municípios mais afetados, sendo assinalados com estrelas amarelas aqueles localizados na região do Vale do Taquari, correspondentes a: Caxias do Sul, Anta Gorda, Roca Sales, Putinga, Dois Lajeados, Encantado e Arvorezinha. Fonte: modificado de Cemaden (2024).

Dentre os diversos movimentos de massa ocorridos na região dos Vales (Vale do Jacuí, Vale do Rio Pardo, Vale do Taquari e Vale do Caí) destacam-se os escorregamentos (tanto translacional quanto rotacional) e o fluxo de detritos. Os escorregamentos do tipo translacional referem-se a ruptura planar paralela à encosta, associados a solos rasos ou sujeitos a uma camada intermediária menos permeável, com movimentação rápida. Já os do tipo rotacionais estão associados a solos mais profundos, com superfície de ruptura influenciada por condicionantes estruturais e de geometria elipsoidal.

Em ambos os cenários, pode ocorrer do conteúdo de água e de energia envolvida no sistema serem suficientemente altos para modificar o comportamento do substrato, fazendo-o assumir características de fluido e sendo então classificados como fluxos de detritos. Estes movimentos apresentam elevado potencial destrutivo

devido a sua capacidade de acúmulo de energia e alta velocidade, tendo sido responsável por diversos óbitos em meio a tragédia de 2024 (Kobiyama, *et al.*, 2024). A imagem abaixo (Figura 30) apresenta um compilado de registros fotográficos associados a ocorrências de movimentos de massa no Vale do Taquari, de acordo com seus respectivos municípios.



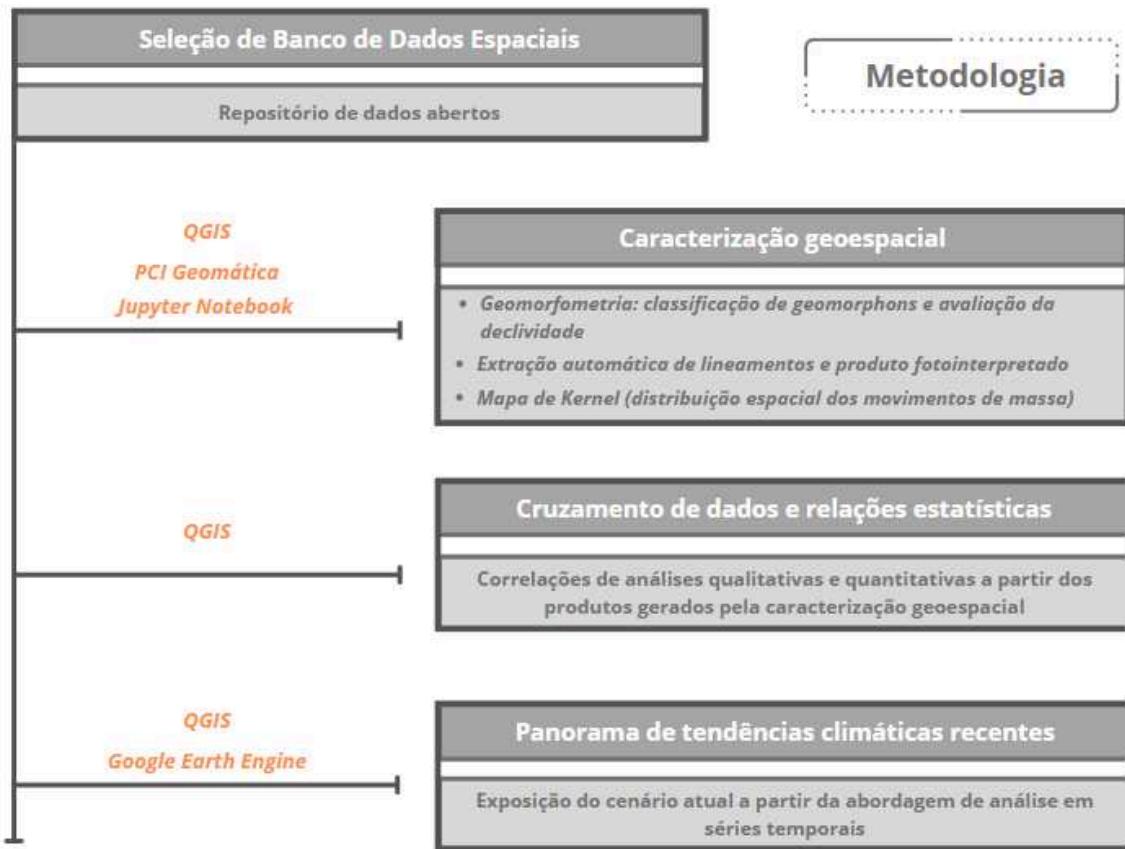
**Figura 30:** Mosaico de fotografias referentes a movimentos de massa ocorridos no Vale do Taquari em meio ao ECE 2024. Fonte: modificado de Freitas *et al.* (2025).

Como forma de compreender esses fenômenos e utilizar as informações adquiridas em prol do gerenciamento da ocupação populacional e prevenção de desastres, é possível utilizar mecanismos de mapeamento de suscetibilidade erosiva e de risco associado. Para tal, é preciso levar em consideração o panorama das características fisiográficas que influenciam na ocorrência dos movimentos de massa, assim como a vulnerabilidade em meio ao contexto de uso e ocupação da terra. Assim, compreender os fatores da dinâmica física (como clima, hidrologia, geologia e geomorfologia), apresentadas nos capítulos iniciais, e aliá-los à influência de distribuição das classes de ocupação pelo território, torna-se essencial para compreender os movimentos de massa tanto em sua origem quanto em suas consequências.

## 6. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste estudo foi desenvolvida para atingir três objetivos centrais. Primeiramente, realizou-se a caracterização geoespacial do Vale do Taquari, delineando o contexto e a classificação dos elementos geomorfológicos e geológico-estruturais da região, com a incorporação de dados referentes a distribuição espacial dos movimentos de massa ocorridos em meio a tragédia de 2024. Em seguida, procedeu-se à integração dos produtos obtidos para interpretar o papel dos fatores físicos mencionados na deflagração desses fenômenos, permitindo análises tanto quantitativas quanto qualitativas para três sub-regiões selecionadas. Por fim, buscou-se apresentar as tendências climáticas recentes da região, com ênfase na ocorrência de eventos hidrológicos extremos, a fim de ilustrar o panorama situacional da área e sua alarmante vulnerabilidade em meio aos potenciais destrutivos das enchentes e movimentos de massa.

Os resultados foram obtidos por técnicas de geoprocessamento e de processamento digital de imagens, com uso dos softwares QGIS, PCI Geomática e da plataforma *Google Earth Engine*, assim como a aplicação *Jupyter Notebook* para a execução de *scripts* em Python. Adicionalmente, o Excel foi utilizado para gerar contribuições gráficas quantitativas, principalmente histogramas. O diagrama abaixo (Figura 31) apresenta a esquematização metodológica que envolveu o cumprimento desses três objetivos, com suas respectivas ferramentas utilizadas.



**Figura 31:** Representação do fluxo metodológico, abrangendo as ferramentas e objetivos.

### 6.1 Caracterização geoespacial.

Para a análise geoespacial dos movimentos de massa, focou-se na avaliação da distribuição da densidade desses eventos e em sua correlação com os aspectos geomorfológicos e geológico-estruturais da região. Para tanto, aplicaram-se técnicas de análise morfoestrutural, empregando como base o Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 metros. Este insumo foi obtido na plataforma EarthExplorer, mantida pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey, USGS*), e está disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Adicionalmente, as cicatrizes dos movimentos de massa referente às chuvas no Rio Grande do Sul, ocorridas entre 23 de abril e 5 de maio de 2024, foram mapeadas pelo grupo CEMADEN/MCTI e UNESP, abrangendo a área referente a Figura 29.A, retirada da Nota Técnica N° 412/2024/SEI-CEMADEN (Cemaden, 2024; Egas *et al.*, 2024). Este trabalho utilizou uma abordagem de análise comparativa de imagens multitemporais: dados do Google (anteriores ao evento) e imagens PlanetScope de 20 e 21 de abril de 2024 (pré-evento), em contraste com as de 6, 7

e 8 de maio de 2024 (pós-evento). As feições resultantes desse mapeamento foram então recortadas para o Vale do Taquari, resultando na cobertura primordialmente na porção norte da região. A base de dados da equipe está publicamente disponível no repositório Zenodo, acessível via DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13225473>.

No que diz respeito à análise geoespacial dos movimentos de massa, o Modelo Digital de Elevação (MDE) permitiu a investigação da trama estrutural e dos padrões topográficos das formas de relevo, utilizando os softwares QGIS e PCI Geomática. A compartimentação geomorfológica foi realizada no QGIS/GRASS pela ferramenta *r.geomorphon*, seguindo a metodologia de classificação de Jasiewicz & Stepinski (2013). Além disso, a análise foi complementada pela classificação da declividade, pelo *software*, seguindo os parâmetros de Hoff (2025).

A extração automática foi produzida pelo módulo LINE, disponível no PCI Geomatica, um *software* de processamento e análise geoespacial amplamente utilizado em sensoriamento remoto e geoprocessamento. Por fim, a camada vetorial referente aos pontos de ruptura dos movimentos de massa foi trabalhada no ambiente QGIS, permitindo a produção de um mapa de *kernel*, utilizado para gerar o panorama de distribuição de densidades.

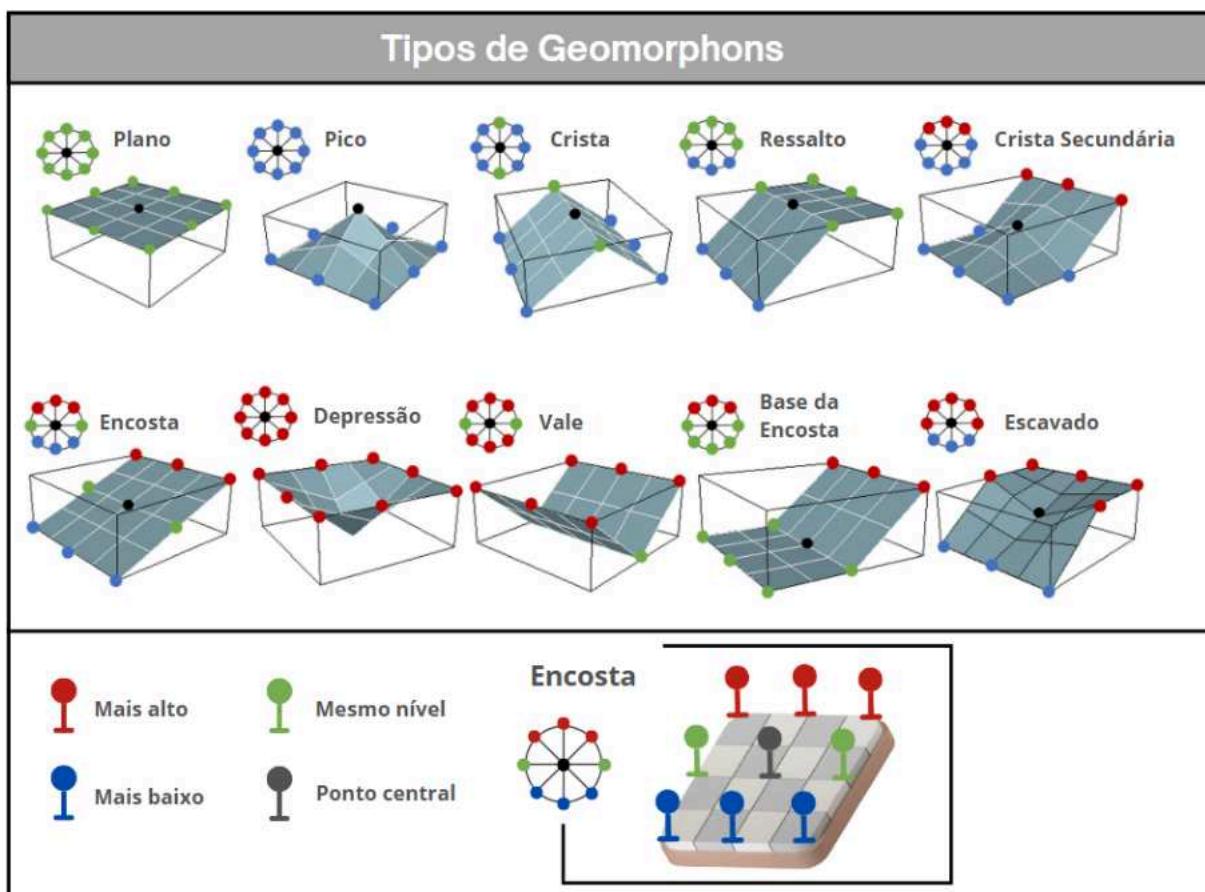
#### 6.1.1 Geomorfometria: classificação de geomorphons e avaliação da declividade

A compreensão dos aspectos geomorfométricos, que envolve a análise quantitativa do relevo por meio de técnicas e ferramentas computacionais, é essencial para mapear e entender a dinâmica da paisagem. Tal abordagem demonstra-se particularmente útil para a compreensão dos processos de movimentos de massa, pois fornece informações aprofundadas sobre a configuração topográfica e seus processos associados, contribuindo para análises mais eficientes. Essa metodologia permite analisar a classificação geomorfológica junto aos padrões de inclinação do terreno, revelando zonas com maior potencial para alagamentos e áreas propensas a escorregamentos.

De forma mais detalhada, o *r.geomorphon* é um algoritmo de classificação de formas do relevo (ou feições do terreno) integrado ao *software* GRASS GIS (GRASS GIS, 2023), sendo acessado neste trabalho por meio da Caixa de Ferramentas do QGIS. Esse módulo permite detectar e mapear automaticamente formas geomorfológicas a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), podendo identificar até 10 formas básicas de relevo, derivadas de um conjunto de 498

padrões geométricos possíveis (GRASS GIS, 2023). O método pode ser aplicado em diversos contextos, como mapeamentos geomorfológicos, análises ambientais e avaliações de áreas de risco, tornando-se uma aplicação útil em estudos geocientíficos.

O funcionamento do algoritmo é inspirado no conceito de *Local Ternary Patterns* (LTP), que compara cada célula central com seus vizinhos em oito direções, classificando-os como mais altos, mais baixos ou no mesmo nível. No entanto, em vez de usar apenas a diferença direta de elevação, o r.geomorphon aplica o princípio da linha de visada, que avalia a visibilidade real do terreno a partir da célula em análise, levando em conta os ângulos entre a superfície e o horizonte (Jasiewicz & Stepinski, 2013). A Figura 32 apresenta as relações entre a morfologia e a classificação das 10 formas de relevo.



**Figura 32:** Tipos de Geomorphons, associando o conceito de o conceito de Local Ternary Patterns (LTP). Fonte: modificado de Wyles *et al.* (2022).

Segundo Jasiewicz & Stepinski (2013), a maioria dos métodos para o mapeamento automatizado de elementos do relevo baseia-se na geometria diferencial, levando em consideração fatores como inclinação e curvatura da

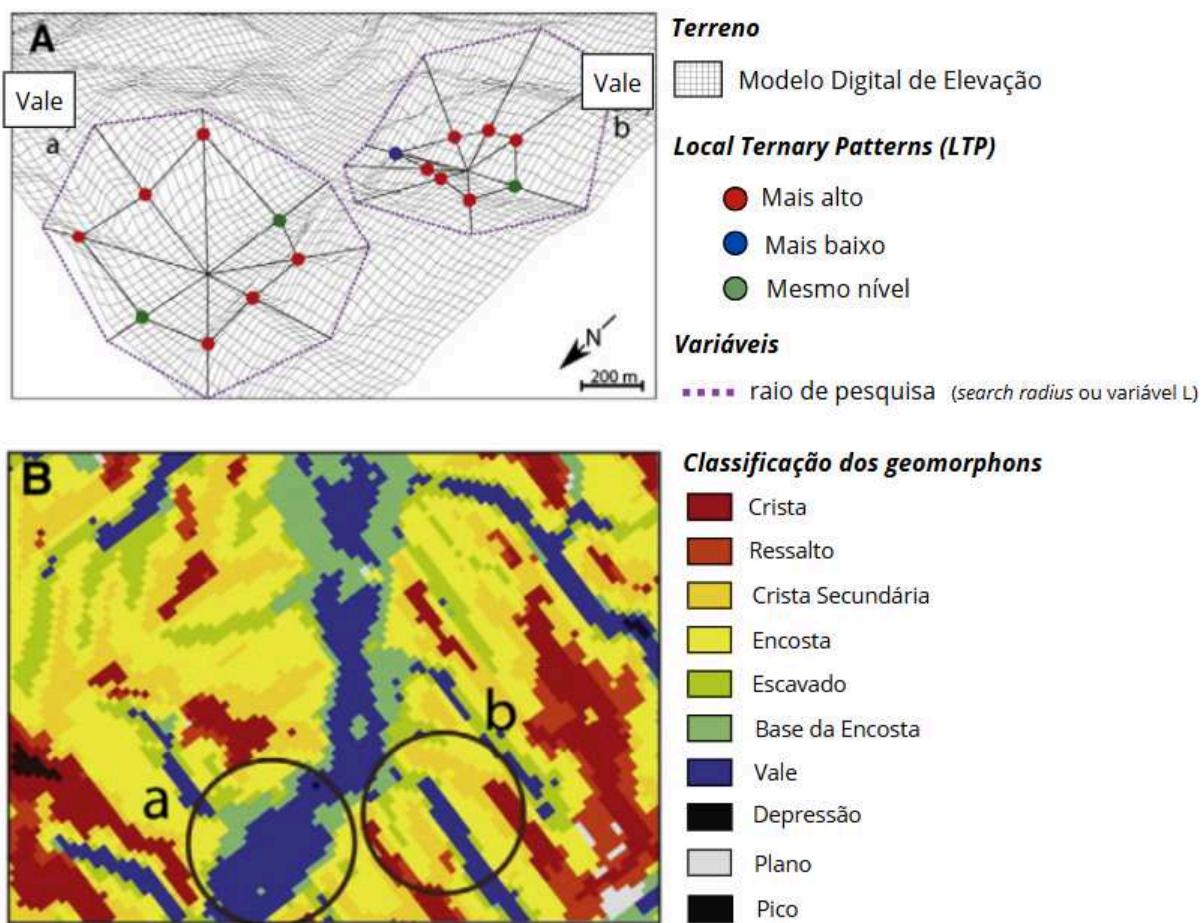
superfície. Apesar desse método ser popular e suficiente para rásters relativamente pequenos, sua eficiência computacional diminui para Modelos Digitais de Elevação (MDEs) de grande escala. Isso se deve à necessidade de cálculos complexos, como aproximações quadráticas da superfície em cada célula, além da utilização de janelas fixas, que não se adaptam à escala real das feições topográficas.

Em contraste, o método por geomorphons apresenta uma abordagem mais eficiente e flexível, ajustando automaticamente a vizinhança de análise à morfologia do terreno com base em visibilidade em oito direções cardinais. Esse comportamento escalável permite que a identificação dos elementos do relevo ocorra de maneira mais precisa e condizente com a morfologia real da paisagem (Jasiewicz & Stepinski, 2013).

O reconhecimento das formas do relevo pelo algoritmo *r.geomorphon* depende principalmente de dois parâmetros: o raio de pesquisa (*search radius* ou variável *L*, referente ao termo *lookup distance*) e o limiar de nivelamento (*flatness threshold*), que controlam, respectivamente, a escala da análise e a sensibilidade à inclinação do terreno (em graus). Nesse contexto, valores menores de *L* permitem identificar formas de relevo menores com maior detalhe, enquanto valores maiores capturam feições mais amplas, embora com perda de detalhes secundários (GRASS GIS, 2023; Jasiewicz & Stepinski, 2013). Além disso, de acordo com o manual do GRASS GIS (GRASS GIS, 2023) o algoritmo também inclui o raio de pesquisa interno (*skip radius*), que ignora pequenas irregularidades mais próximas da célula central, e a distância plana (*flatness distance*), que limita a influência de áreas muito distantes dentro do raio de análise, sendo especialmente útil em MDEs de baixa resolução, onde diferenças de elevação sutis podem ser distorcidas pela distância horizontal.

A imagem abaixo, Figura 33, apresenta um exemplo da adaptação dos geomorphons à escala do terreno local. O quadro A ilustra uma superfície caracterizada por um vale principal amplo e vales laterais mais estreitos. São destacados dois pontos de análise: 'a', situado no centro do vale largo, e 'b', localizado em um dos vales menores. Os octógonos roxos, de tamanho uniforme em ambos os pontos e indicando um raio de pesquisa fixo de 15 células, delimitam a extensão máxima de análise do terreno (referente ao raio de pesquisa ou variável *L*). Em contrapartida, os octógonos internos e irregulares, com dimensões variáveis nos pontos 'a' e 'b', são definidos pelo princípio da linha de visada nas oito direções

cardinais, determinando a escala real em que o elemento da forma do relevo é detectado. Embora em ambos os pontos o elemento identificado seja um vale, a detecção em 'a' ocorre em uma escala menor, enquanto em 'b' a escala de detecção é menor, refletindo a morfologia local. O Painel B apresenta o mapa resultante da aplicação do algoritmo para o MDE correspondente ao Painel A, onde os pontos 'a' e 'b' estão no centro de círculos, que representam a distância de busca L. Este mapa demonstra a correta delimitação de vales e outros elementos do relevo em diversas escalas (Jasiewicz & Stepinski, 2013).



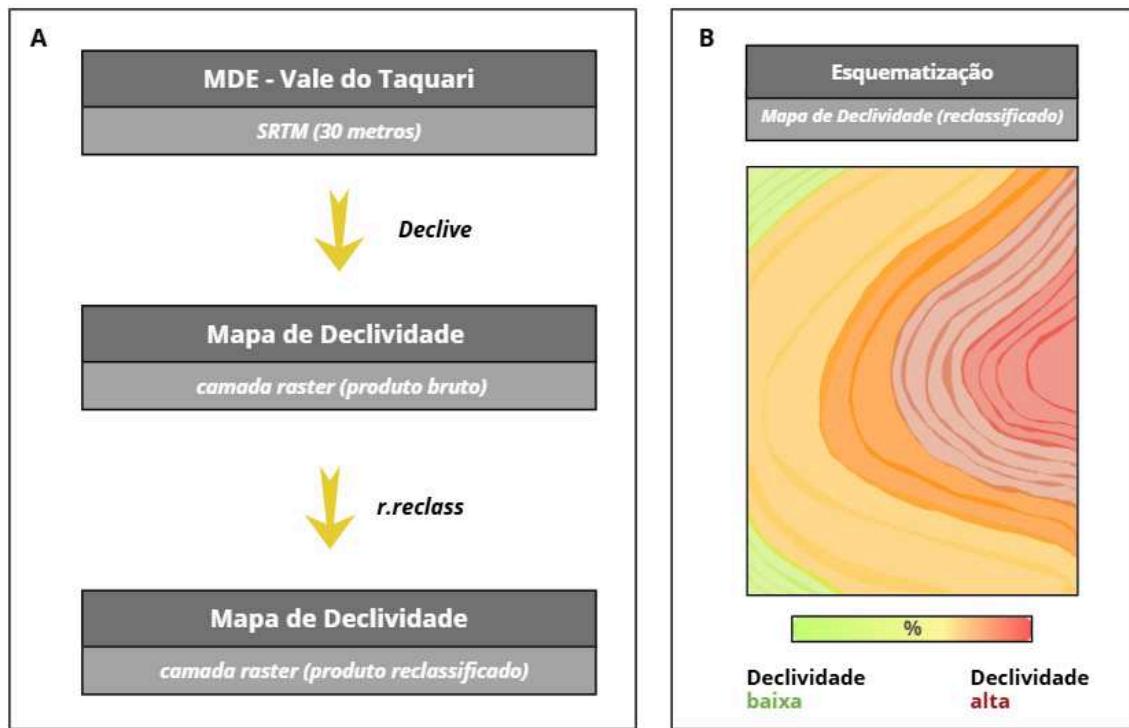
**Figura 33:** Adaptação dos geomorphons à escala do terreno local. O quadro A ilustra um terreno caracterizado por um vale principal amplo e vales laterais mais estreitos, destacando dois pontos de análise (a e b). Os octógonos roxos delimitam a extensão máxima de análise do terreno (raio de pesquisa), e referem-se a 15 células ( $L=15$ ). Já os octógonos internos e irregulares, são definidos pelo princípio da linha de visada nas oito direções cardinais, determinando a escala real em que o elemento da forma do relevo é detectado para os pontos 'a' e 'b'. O Painel B apresenta o produto final da aplicação do algoritmo *r.geomorphon* para este terreno, onde os pontos destacados em A estão no centro dos círculos. Fonte: modificado de Jasiewicz & Stepinski (2013).

Para este estudo, o MDE de entrada correspondeu a um recorte do SRTM para a área de interesse com de resolução espacial 30 metros e reprojetado para o datum SIRGAS 2000 / UTM 22 S. Em seguida, optou-se pelo valor da escolha dos parâmetros por tentativas experimentais, como representado na tabela abaixo (Tabela 03), com as unidades de pesquisa definidas em metros:

Parâmetro	Valor Atribuído
Raio de pesquisa (L)	270
Raio de pesquisa interno	90
Limiar de nivelamento	2
Distância plana	0

**Tabela 03:** Relação entre os valores dos parâmetros escolhidos para a produção do mapa geomorfométrico pelo algoritmo *r.geomorphon*, com as unidades de pesquisa em metros.

Para complementar a análise dos geomorphons, o MDE também foi a base para a criação do mapa de declividade, um processo realizado em duas etapas. Primeiro, foi utilizado a ferramenta *declive* para gerar um raster de declividade em porcentagem. Em seguida, foi empregado a ferramenta *r.reclass*, para classificar essas declividades em categorias específicas, de acordo com intervalos de inclinação progressivos, como em Hoff (2025). Ambos os estágios foram processados no ambiente QGIS, a partir das aplicações do GDAL e do GRASS, na Caixa de Ferramentas. O fluxo presente na Figura 34 corresponde à sucessão desses processos.



**Figura 34:** Processo de elaboração de um mapa de declividade no QGIS, sendo (A) o fluxo metodológico para a geração do produto e em (B) a esquematização de um mapa de declividade após o processo de reclassificação. As ferramentas utilizadas estão dispostas à direita das setas em amarelo, que representam a progressão de ações dentro *software*.

Este produto seguiu a proposta de categorização de Hoff (2025), que analisa o risco a escorregamentos e alagamentos de acordo com a inclinação do terreno, conforme detalhado na Tabela 04. Essa abordagem permitiu analisar a classificação geomorfológica sob a perspectiva do risco potencial em um cenário de eventos hidrológicos extremos, sendo um dos subsídios utilizados para discutir a influência dos aspectos geomorfométricos na deflagração de movimentos de massa durante o ECE 2024.

Declividade (%)	Risco Potencial
0 - 3	maior potencialidade para alagamento/encharcamento
3 - 15	baixa potencialidade para escorregamento
15 - 30	média potencialidade para escorregamento
30 - 45	alta potencialidade para escorregamento
> 45	muito alta potencialidade para escorregamento

**Tabela 04:** Relação entre declividade e risco potencial de alagamentos e escorregamentos, de acordo com Hoff (2025).

### 6.1.2 Extração automática de lineamentos e produto fotointerpretado.

O software PCI Geomática (Catalyst, 2025) foi utilizado para extrair automaticamente os lineamentos relacionados à região de interesse. Esta aplicação parte do princípio que lineamentos correspondem a feições lineares ou suavemente curvas observadas em imagens. Essas feições podem representar tanto estruturas artificiais, como estradas e canais, quanto formações naturais, como falhas, fraturas, limites litológicos ou redes de drenagem. A detecção destes baseia-se, geralmente, em variações de intensidade na imagem, identificadas por meio de gradientes. Embora existam algoritmos que automatizam esse processo, os métodos numéricos ainda não se igualam a percepção visual humana, que é capaz de reconhecer uma linha contínua mesmo diante de variações de direção e intensidade. Por esse motivo, o produto foi refinado posteriormente por meio de técnicas fotointerpretativas manuais.

Para a extração automática, o MDE serviu como insumo para a aplicação do módulo LINE no software PCI Geomática, versão 2020. Esta ferramenta foi projetada para extraír feições lineares de uma imagem e gravá-las em um segmento vetorial de polilinhas. O módulo LINE utiliza um único canal de imagem como entrada. Se o canal de entrada for de 16 ou 32 bits, a imagem é inicialmente reescalada para 8 bits, empregando-se uma rotina de conversão. No caso do raster utilizado (SRTM, 30 metros), o valor era de 32 bits. Como saída, o LINE produz um segmento vetorial contendo as feições lineares extraídas (Catalyst, 2025).

Ao todo, 6 parâmetros são definidos pelo usuário, cada qual apresentando um papel na extração automática das feições: raio de filtro (*Filter Radius*), limiar de gradiente de borda (*Edge Gradient Threshold*); limiar para comprimento de curva (*Curve Length Threshold*); limiar para ajustamento de erros de linhas (*Line Fitting Error Threshold*); limiar para diferenças angulares em graus (*Angular Difference Threshold*); limiar de conexão de distâncias (*Linking Distance Threshold*). A Tabela 05 apresenta cada uma dessas variáveis, definidas a partir de abordagem experimental, com suas abreviações e respectivos significados, assim como os valores atribuídos neste estudo (Catalyst, 2025).

Além disso, o algoritmo LINE é composto por três estágios principais: detecção de bordas, limiarização e extração de curvas. Na primeira etapa, utiliza-se o algoritmo de Canny, que aplica um filtro Gaussiano (como o definido pelo raio de filtro, RADI) e calcula o gradiente da imagem, além de eliminar os pixels que não

representam máximos locais, resultando numa imagem de intensidade de bordas. Em seguida, na etapa de limiarização, essa imagem é convertida em binária com base no parâmetro GTHR (limiar de gradiente de borda), onde cada pixel ativo (ON) representa um elemento de borda (Catalyst, 2025).

No terceiro estágio, ocorre a extração de curvas a partir da imagem binária de bordas, composta por várias sub etapas, envolvendo inicialmente a redução das bordas a linhas de um único pixel, utilizando posteriormente o valor estabelecido pelo LTHR (limiar para comprimento de curva) e o FTHR (limiar para ajustamento de erros de linhas) para extrair as sequências de pixels que formam cada curva e convertê-las para formato vetorial. Por fim, o algoritmo conecta pares de polilinhas que satisfazem dois critérios: os segmentos finais devem estar voltados um para o outro e com orientação semelhante (ângulo entre eles inferior ao valor definido por ATHR) e devem estar suficientemente próximos (distância entre os pontos finais menor que o valor de DTHR). As polilinhas finais são então salvas em um segmento vetorial (Catalyst, 2025).

O produto obtido foi exportado como *shapefile* e incorporado ao ambiente QGIS, onde teve suas feições refinadas por meio de técnicas fotointerpretativas, que consideraram as relações morfológicas do terreno com outros fatores físicos, tais como anomalias no padrão geométrico das drenagens.

Como forma de aprofundar a análise estrutural, foram desenvolvidos dois subprodutos: um diagrama de roseta e um mapa de densidade linear de fraturas, ambos elaborados a partir de *scripts* Python executados no ambiente *Jupyter Notebook*. Para isso, o *shapefile* contendo os lineamentos passou por um processamento inicial no QGIS, onde foi calculado o azimute de cada feição linear com base nas suas coordenadas de início e fim. Os valores obtidos foram então ajustados para o intervalo de 0° a 180°, com objetivo de evitar redundâncias e focar nas direções preferenciais de orientação, oferecendo uma leitura mais clara dos padrões estruturais. Posteriormente, os azimutes foram classificados em intervalos angulares de 15° (formando 12 famílias), permitindo a identificação de tendências predominantes.

Esse insumo foi levado para o ambiente do *Jupyter Notebook* para a geração dos produtos finais. Nesse caso, o diagrama de roseta foi elaborado a partir das 12 famílias de feições lineares, permitindo a plotagem do diagrama em formato semi-circular. Já o mapa de densidade linear de fraturas foi gerado a partir do cálculo

da razão entre o comprimento total de fraturas e a área onde estão inseridas ( $m/m^2$ ) expressando a densidade linear por unidade de área (definida por células de 16  $km^2$ ). O resultado condiz a um arquivo raster de resolução espacial de 4.000 metros, em que a escala de cores reflete a variação espacial da densidade de fraturas, que indica zonas mais deformadas ruptilmente.

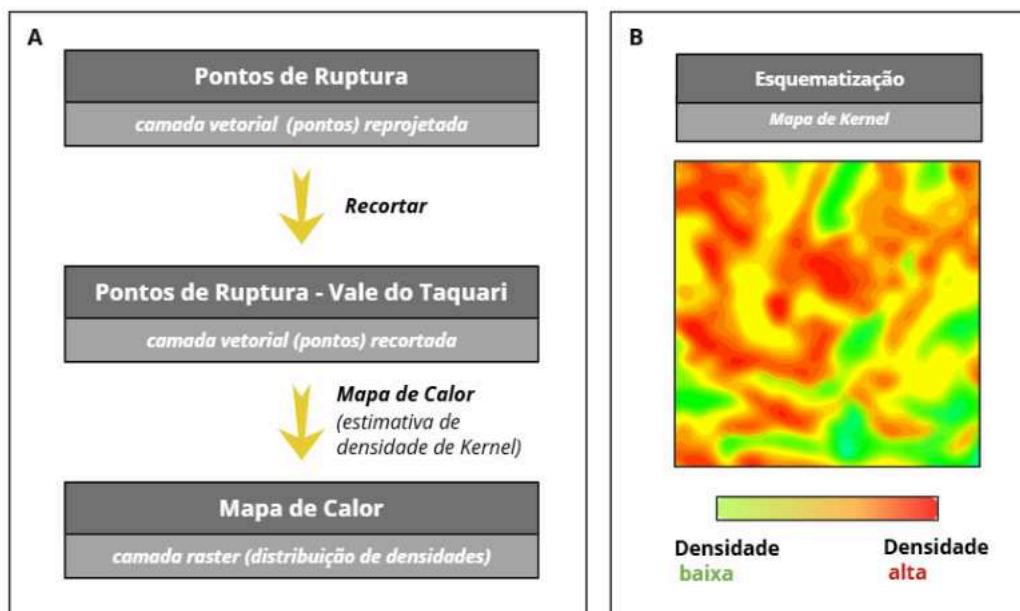
Parâmetro	Tradução	Sigla	Significado	Valor Atribuído
<b>Filter Radius</b>	raio de Filtro	RADI	Especifica o raio do filtro de detecção de bordas, em pixels. Este parâmetro determina, aproximadamente, o menor nível de detalhe na imagem de entrada que pode ser detectado. Um valor elevado de RADI indica que menos detalhes serão detectados, assim como menos ruído. O valor padrão é 10.	10
<b>Edge Gradient Threshold</b>	limiar de gradiente de borda	GTHR	Especifica o limiar, em pixels, para o nível mínimo de gradiente necessário para que um pixel seja considerado de borda. Esse valor deve estar entre 0 e 255; o valor padrão é 100.	20
<b>Curve Length Threshold</b>	limiar para comprimento de curva	LTHR	Define o comprimento mínimo de uma curva, em pixels, para que ela seja considerada como um lineamento ou para ser avaliada em etapas posteriores (como ligação com outras curvas). O valor padrão é 30.	50
<b>Line Fitting Error Threshold</b>	limiar para ajustamento de erros de linhas	FTHR	Especifica o erro máximo permitido, em pixels, ao ajustar uma polilinha a uma curva de pixels. Valores mais baixos proporcionam um ajuste mais preciso, mas também resultam em segmentos mais curtos na polilinha.	20
<b>Angular Difference Threshold</b>	limiar para diferenças angulares	ATHR	Define o ângulo máximo, em graus, entre segmentos de uma polilinha. Se o ângulo ultrapassar esse valor, a polilinha será segmentada em dois ou mais vetores. Esse ângulo também é utilizado para determinar o ângulo máximo entre dois vetores para que possam ser ligados. O valor padrão é 30.	30
<b>Linking Distance Threshold</b>	limiar de conexão de distâncias	DTHR	Especifica a distância máxima, em pixels, entre os pontos finais de dois vetores para que possam ser conectados. O valor padrão é 20.	50

**Tabela 05:** Relação entre os parâmetros e seus significados de acordo com a documentação do PCI Geomatics (Catalyst, 2025), assim como os valores atribuídos neste estudo.

### 6.1.3 Análise da distribuição espacial dos movimentos de massa

O estudo da configuração espacial dos movimentos de massa ocorridos em meio a tragédia de 2024 é uma ferramenta essencial para compreender a distribuição e a concentração desses eventos e seus possíveis fatores relacionados, contribuindo para o planejamento territorial e a gestão de riscos. Neste estudo, foi elaborado um mapa de calor (*heatmap*) por meio do *software* QGIS, com base na no arquivo vetorial de pontos de ruptura, registrados por Egas *et al.* (2024).

A camada, contendo 3556 pontos, estava originalmente em coordenadas geográficas (WGS84), sendo então reprojetada para o sistema de referência SIRGAS 2000/ UTM 22S. Posteriormente, foi recortada de acordo com os limites do Vale do Taquari, com o objetivo de delimitar a amostragem à área de interesse. Em seguida, utilizou-se essa camada para a geração de um mapa de calor, por meio da ferramenta de estimativa de densidade *kernel*. Como o processamento do algoritmo extrapolou os limites do vale, o raster resultante foi novamente recortado. A Figura 35 apresenta a esquematização do processo de geração do mapa de calor, a partir da camada já reprojetada.



**Figura 35:** Etapas para a elaboração do Mapa de Kernel (A) e ilustração esquemática do raster, com os tons laranja-avermelhados referentes a maiores densidades (B). As ferramentas utilizadas estão dispostas a direita das setas em amarelo, que representam a progressão de ações dentro do QGIS.

Na elaboração do mapa de densidade *kernel* com base nos dados disponíveis (predominantemente localizados na região norte do Vale do Taquari) foram adotados os seguintes parâmetros, conforme especificado na Tabela 06: raio de influência de 6.000 metros, resolução espacial (tamanho do pixel) de 1.000 metros e o uso do formato de kernel quartílico. O raio de influência define o alcance espacial em torno de cada ponto de ruptura, delimitando a área na qual sua presença afeta a estimativa de densidade. Já o tamanho do pixel determina o grau de detalhamento do raster gerado, influenciando diretamente na precisão visual e analítica do mapa. Por fim, o kernel quartílico (função padrão no algoritmo) foi selecionado por sua ampla aplicação em análises geográficas, proporcionando uma suavização eficiente com decaimento gradual da influência à medida que se afasta do ponto central.

Parâmetro	Valor Atribuído
Raio	6.000
Tamanho do Pixel	1.000
Kernel Shape	Quártico

**Tabela 06:** Parâmetros utilizados para a elaboração do mapa de kernel. Os valores basearam-se em testes múltiplos, com o objetivo de adequar os resultados ao contexto de distribuição de pontos.

Para a produção do mapa, valores elevados foram adotados principalmente devido aos pontos de ruptura relativamente dispersos na porção sul do dataset, possivelmente por subamostragem. Assim, um raio maior permite que as zonas de influência dos pontos se sobreponham, formando uma superfície contínua e mais representativa das áreas de concentração de eventos. A escolha de pixels amplos, por sua vez, reduz o excesso de fragmentação visual e torna o mapa mais legível. Além disso, em termos de estilização de camada, foi adotada uma interpolação linear, com reamostragem cúbica e classificação por quantis, em dez partes. Sua visualização foi dada pela categoria banda simples falsa cor, com a configuração de valores mínimos e máximos de forma automática.

O resultado consiste em uma imagem raster que exibe valores em gradiente, refletindo a concentração desses pontos e, consequentemente, permitindo a identificação das áreas com maior ocorrência de deflagração dos movimentos de massa. Esse produto é uma forma eficiente de visualizar e destacar regiões de maior intensidade de eventos, facilitando sua correlação com outros mapas temáticos.

## 6.2 Cruzamento de dados e correlações

Neste item, foram selecionadas três sub-regiões de interesse, com base em critérios como a densidade de movimentos de massa e os impactos socioeconômicos decorrentes do ECE 2024 nos municípios. A partir dessas áreas, foram realizadas análises quantitativas básicas e estatísticas descritivas, com o apoio do QGIS e Excel, buscando identificar padrões e relações relevantes entre os dados geográficos e os efeitos observados em campo. Inicialmente, procedeu-se à caracterização dessas sub-regiões sob a perspectiva dos movimentos de massa, considerando o número de rupturas e a extensão destes, bem como seus valores mínimo e máximo. Além disso, foram extraídas informações da média e mediana. Em seguida, foram realizadas análises comparativas entre os dados obtidos a partir da caracterização geoespacial, o que possibilitou conduzir análises geomorfométricas e estruturais nas sub-regiões.

Esta vertente da metodologia foi delineada com o propósito de promover a integração e interpretação dos dados geomorfológicos e geológicos-estruturais obtidos, visando à compreensão dos fatores que influenciaram a deflagração dos movimentos de massa ocorridos durante a tragédia de 2024, na região de interesse do Vale do Taquari. Nesse contexto, os mesmos softwares foram utilizados para compilar as camadas temáticas essenciais e extrair visualizações gráficas, estabelecendo correlações múltiplas entre os produtos gerados pela análise geoespacial, por meio de técnicas qualitativas e quantitativas. Este enfoque visa identificar tendências e fundamentar explicações por meio de análises em diferentes escalas, abrangendo o cenário geral e recortes onde percebe-se maiores anomalias.

Para cada uma das sub-regiões, foram elaborados histogramas representando a proporção relativa dos geomorphons presentes e a distribuição das declividades. Além disso, foram realizadas análises interpretativas da geologia estrutural local, comparando essas informações com o diagrama de roseta e com o mapa de densidade linear de fraturas anteriormente produzido. As principais investigações tiveram como objetivo fazer a síntese dos cruzamentos dos dados mais significativos e evidenciar padrões espaciais recorrentes. Dessa forma, três eixos temáticos foram selecionados:

- Proporção dos geomorphons nas áreas de maior densidade de movimentos de massa: gráficos com a proporção de cada classe de geomorphon nas zonas críticas.

- Distribuição de declividades nas áreas com maior ocorrência de movimentos de massa: estatísticas descritivas quanto a relação entre o potencial de risco em função da declividade nas áreas de maior ocorrência;
- Relação da trama estrutural e movimentos de massa: correlação entre o panorama estrutural da região e observações quanto às suas características para áreas mais afetadas pela deflagração dos movimentos de massa.

### 6.3 Panorama de tendências climáticas recentes

Essa vertente da metodologia parte da perspectiva de que a compreensão das tendências climáticas torna-se essencial em meio a um cenário crescente de ocorrência de ECE's, que possuem alarmantes potenciais destrutivos, como os danos causados pelos movimentos de massa no Vale do Taquari em decorrência da tragédia de 2024 no Rio Grande do Sul.

Esta parte do estudo foi realizada utilizando a plataforma *Google Earth Engine*, em linguagem JavaScript, permitindo o processamento e a análise de grandes volumes de dados geoespaciais. Foram empregados os produtos CHIRPS (*Precipitation Measurement from Satellite Data*) e MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para a geração de análises em séries temporais, considerando as variáveis precipitação, temperatura e evapotranspiração. A Tabela 07 detalha as especificações de cada uma das bases de dados utilizadas.

A investigação compreendeu a região do Vale do Taquari em sua totalidade, envolvendo climograma e gráfico de balanço hídrico para o período de 2000 a 2024, além de climogramas referentes aos anos de 2020, 2023 e 2024 (ocorrências recentes de eventos meteorológicos extremos). Esses dados foram aliados com a literatura referente aos marcos de tragédias e eventos de precipitações extremas.

Dataset	Produto	Provedor do Conjunto de Dados	Descrição	Cadência	Resolução Espacial
CHIRPS	CHIRPS Daily	UCSB/CHG	Fornecerá dados de precipitação quase global, abrangendo mais de 30 anos e combinando imagens de satélite com dados de estações in situ, sendo especialmente utilizado para a análise de tendências de chuva e o monitoramento sazonal de secas	1 dia	0,05 °
MODIS	MOD11A1.061	NASA LP DAAC no Centro EROS do USGS	Fornecerá a Temperatura da Superfície Terrestre (LST) e a emissividade, em escala global, com valores de LST em latitudes elevadas calculados pela média de múltiplas observações de céu claro, e inclui bandas de temperatura diurna/noturna e indicadores de qualidade.	1 dia	1 km
MODIS	MOD16A2GF.061	NASA LP DAAC no Centro EROS do USGS	Fornecerá estimativas de evapotranspiração e de fluxo de calor latente.	8 dias	500 m

**Tabela 07:** Conjunto de dados utilizados para a análise de tendências climáticas recentes, produtos derivados do CHIRPS (Funk *et al.*, 2015) e MODIS (NASA, 2021; Zhengming *et al.*, 2025).

O gráfico de balanço hídrico foi produzido com base em dados mensais de precipitação (P) pelo banco de dados do CHIRPS e evapotranspiração (ET) a partir do MODIS (MOD16A2GF.061). Para cada mês, calculou-se a diferença entre a precipitação acumulada e a evapotranspiração corrigida (multiplicada por 0,1), resultando no balanço hídrico mensal (P - ET). Esses dados foram organizados numa coleção temporal de imagens com metadados de ano e mês. Embora o código não calcule explicitamente os totais anuais, o gráfico gerado apresenta a média mensal dessas variáveis ao longo dos anos, permitindo visualizar tendências e variações anuais.

Para o climograma referente ao período de 2000 a 2024, a precipitação anual foi obtida a partir da soma dos dados diários da coleção CHIRPS, enquanto a temperatura anual média foi calculada com base nos dados diários da banda de temperatura diurna da coleção MODIS (MOD11A1.061), convertida de Kelvin para Celsius. Ambas as variáveis foram emparelhadas ano a ano, gerando um gráfico contendo a precipitação (em barras) e a temperatura (em linha contínua), permitindo analisar visualmente as relações entre esses atributos.

#### 6.4 Limitações do Método

Todo estudo científico, inherentemente, possui limitações metodológicas que precisam ser reconhecidas e explicitadas, pois influenciam diretamente o escopo e nos resultados obtidos. No presente trabalho, o principal fator limitante consiste na

abrangência espacial do banco de dados de movimentos de massa empregado. Embora este mapeamento, conduzido por Egas *et al.* (2024), seja reconhecidamente detalhado e rigoroso, sua cobertura para a área de interesse se restringe principalmente à porção norte do Vale do Taquari. Essa restrição geográfica implica que as inferências e conclusões derivadas podem não ser generalizáveis para a totalidade da região do vale, um aspecto crucial a ser considerado na interpretação dos produtos gerados.

Outra limitação observada foi a escolha da região de análise para o processamento dos produtos gerados a partir do MDE. Nesse caso, para mitigar os efeitos de borda, o raster empregado na extração automática de lineamentos e análises geomorfométricas excedeu os limites do Vale do Taquari, correspondendo a uma região retangular de aproximadamente 8.000 Km<sup>2</sup>, dos quais apenas cerca de 4.240 Km<sup>2</sup> estão relacionados ao vale. Essa ampliação da área de estudo garantiu que fosse feita adequadamente a inclusão de dados relevantes próximos às bordas do território, mas gerou produtos que se estenderam para além da área de interesse principal.

Em contrapartida, o mapa de *kernel* não pôde abranger essa mesma região expandida, pois, ao considerar movimentos de massa deflagrados fora do território de estudo principal, o cenário de densidades relativas é alterado, gerando uma falsa impressão da intensidade da distribuição espacial dos eventos ocorridos no Vale do Taquari. Portanto, como uma forma de adequar melhor os resultados de cada produto, foi preciso estabelecer áreas de interesse diferentes, algo comumente evitado, para fins de padronização.

Além disso, a elaboração do panorama de tendências climáticas envolveu o uso de dados com resoluções espaciais e temporais distintas, o que representa um desafio metodológico ao comprometer a uniformidade e a comparabilidade dos resultados. Os produtos CHIRPS (para precipitação) e MODIS (para temperatura da superfície terrestre e evapotranspiração) possuem escalas diferentes, embora ambos sejam amplamente reconhecidos pela sua robustez, cobertura histórica e qualidade dos registros. Além disso, a cadência do produto MODIS para evapotranspiração (MOD16A2GF.061) é de 8 dias, diferentemente dos outros dois *datasets* (de resolução temporal de 1 dia).

Apesar desses aspectos, optou-se pela utilização dessa base de dados, devido à confiabilidade das séries temporais e da abrangência geográfica oferecida.

Para compatibilizar os dados, foi necessário aplicar técnicas de reajuste, que, embora essenciais, podem introduzir distorções na integridade dos dados, como a perda de detalhes locais. Esses efeitos podem comprometer a precisão na detecção de tendências climáticas, no entanto, os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, indicando que, mesmo após o processo de adequação, o conjunto de dados manteve sua consistência e é confiável para a análise proposta.

## 7. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir dos três eixos principais de análise: (i) a caracterização geoespacial da distribuição dos movimentos de massa; (ii) os cruzamentos temáticos e as relações estatísticas entre os eventos e seus condicionantes geomorfológicos, geológicos e estruturais; e (iii) a interpretação das tendências climáticas recentes. As análises foram conduzidas com o intuito de compreender os fatores que condicionaram a deflagração dos movimentos de massa no Vale do Taquari durante o ECE 2024. Como complemento a essa abordagem integrada, é também apresentado um panorama sobre os impactos das mudanças climáticas na intensificação e frequência de eventos hidrológicos extremos, contribuindo para agravar a vulnerabilidade da região frente aos fenômenos cada vez mais emergentes.

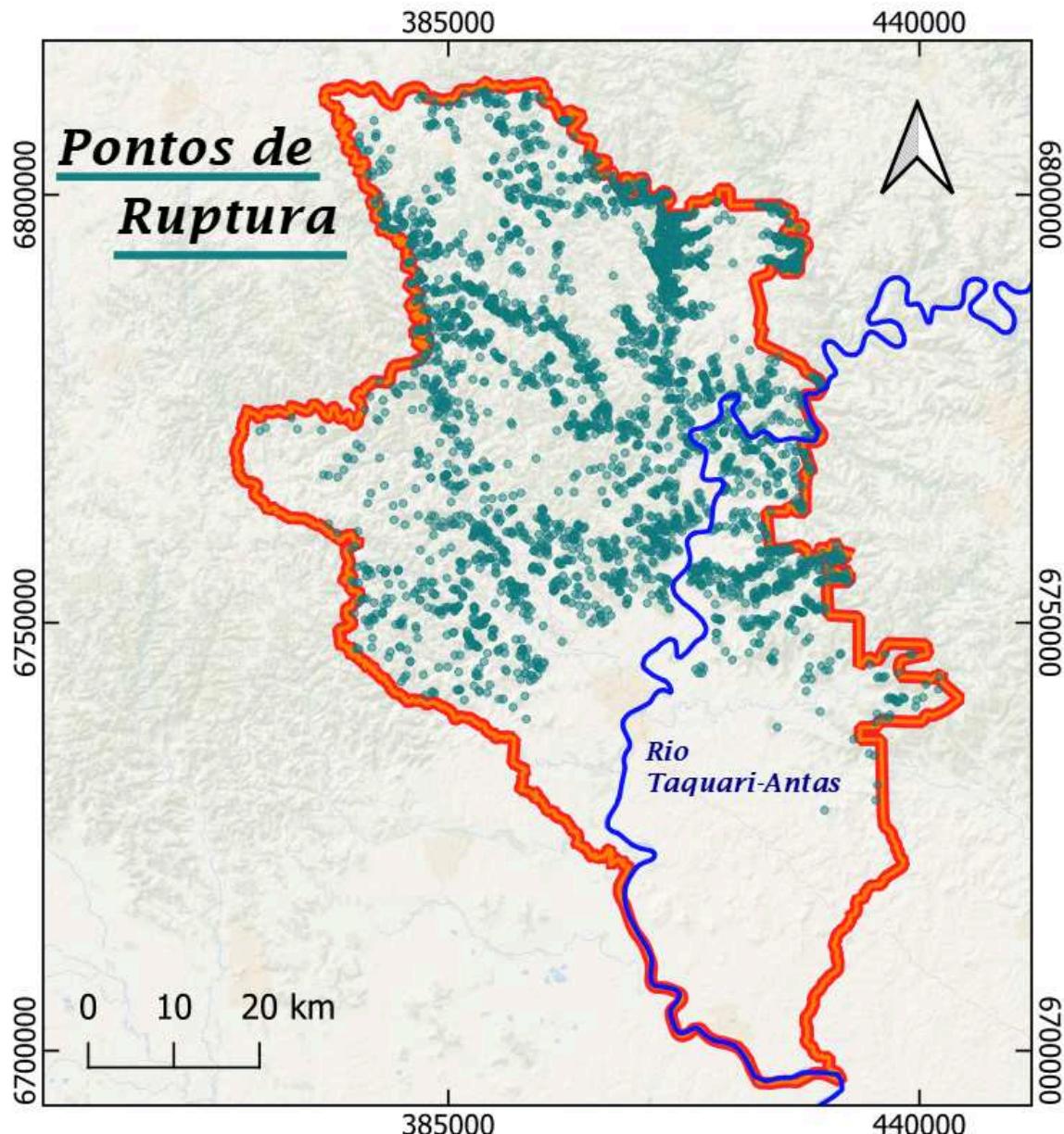
As subseções a seguir organizam os resultados em uma progressão temática, seguindo a ordem de apresentação dos objetivos.

### 7.1 Caracterização geoespacial

A caracterização geoespacial teve como objetivo investigar potenciais fatores condicionantes da deflagração dos movimentos de massa, na perspectiva geomorfológica, geológica e estrutural. Essa etapa foi fundamental para compreender como esses elementos favoreceram ou influenciaram a ocorrência desses processos.

Em função de limitações relacionadas à abrangência geográfica dos dados disponíveis, as análises não contemplaram a totalidade do Vale do Taquari. Portanto, foi necessário realizar um recorte espacial restrito à área coberta pelo mapeamento dos movimentos de massa, conforme o *dataset* disponibilizado por Egas *et al.* (2024). De forma mais específica, foram registrados 3.556 pontos de ruptura na região, apresentando uma área total de movimentos de massa de cerca de 23 km<sup>2</sup>.

Além disso, estatísticas descritivas indicam que a área média foi de 7.000 m<sup>2</sup>, enquanto a máxima registrada atingiu 0,25 km<sup>2</sup>. A Figura 36, ilustra os pontos de ruptura mapeados por este grupo, que representam a extensão espacial da base de dados utilizada para a geração dos resultados nesta seção.



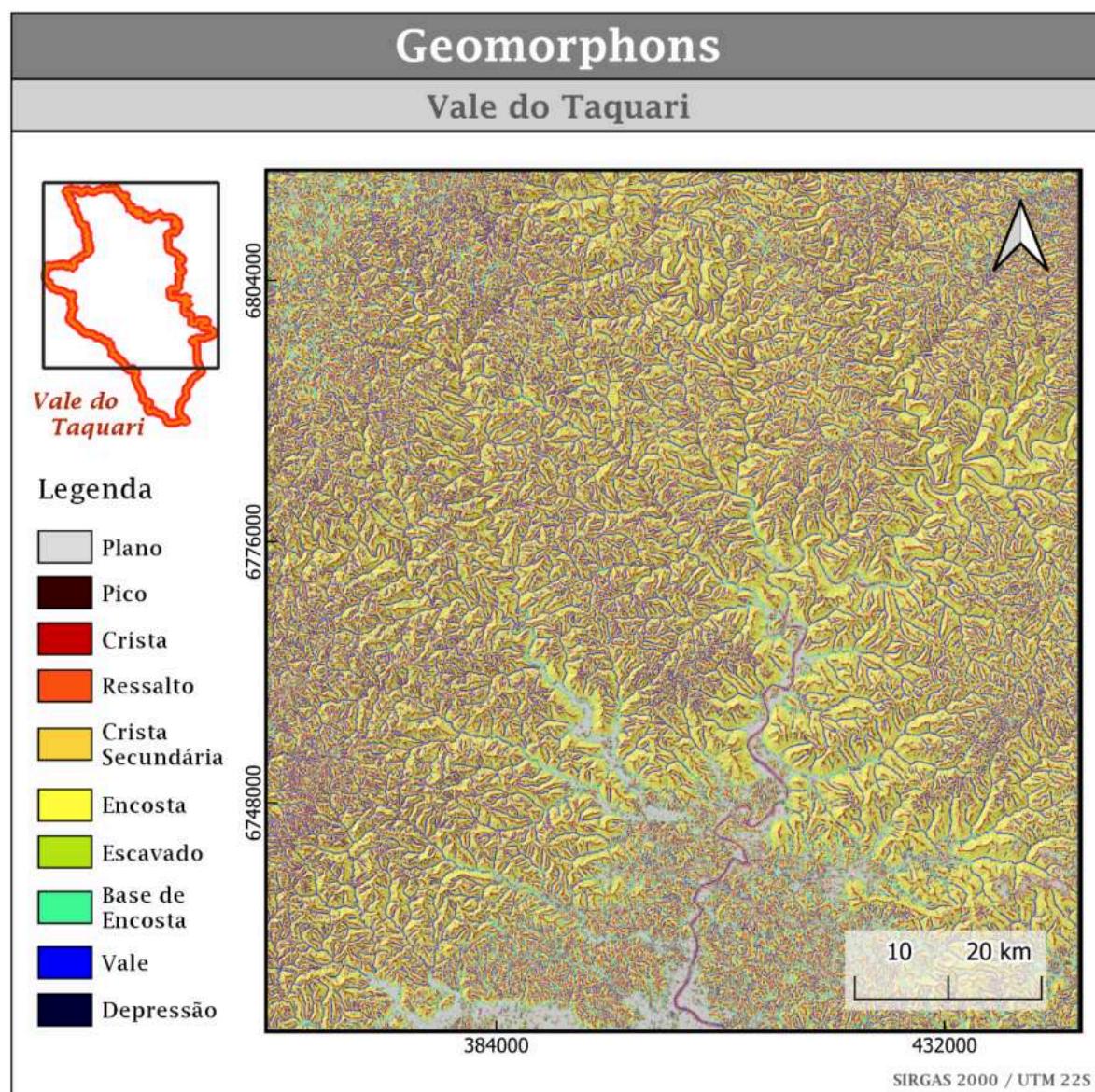
**Figura 36:** Pontos de ruptura, indicando a ocorrência dos movimentos de massa. Essa imagem ilustra a abrangência espacial da área analisada nos próximos itens. Fonte de dados: Egas *et al.* (2024).

#### 7.1.1 Geomorfometria: classificação de geomorphons e avaliação da declividade

As análises geomorfométricas foram conduzidas com base na integração de dois produtos principais: a classificação das formas do relevo por meio do algoritmo

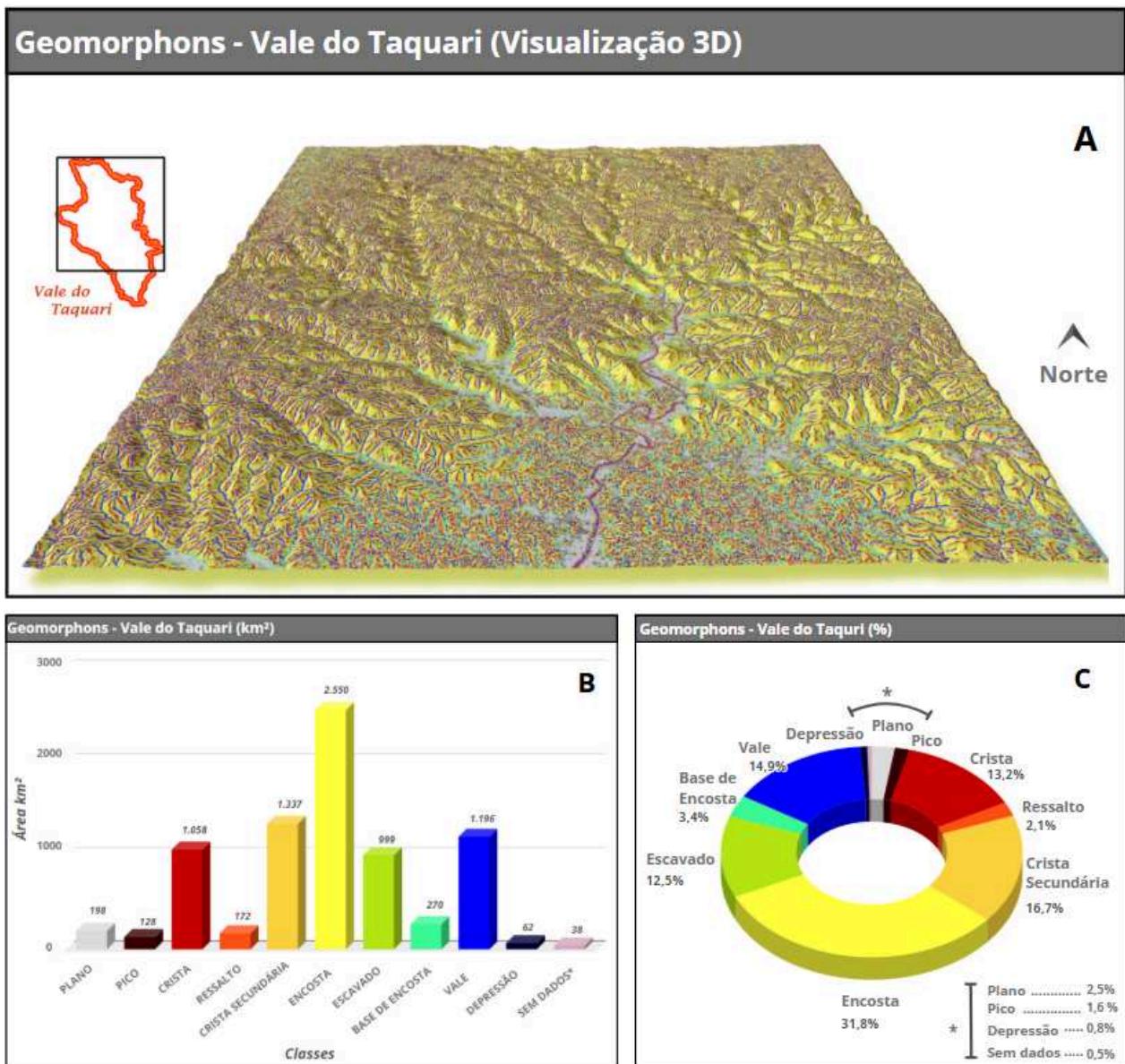
*r.geomorphon* e a elaboração de um mapa de declividade. A Figura 37 apresenta o resultado da classificação dos geomorphons, cujos parâmetros adotados estão descritos na Tabela 03.

Pode-se dizer que o algoritmo mostrou-se eficaz na caracterização das formas do relevo, identificando as dez classes possíveis, o que evidencia diversidade morfológica. Na Figura 37, verifica-se que as áreas planas e suavemente onduladas se concentram principalmente na porção sul do mapa, estendendo-se também ao longo do curso principal do Rio Taquari-Antas, relacionado à sua planície de inundação. Para além deste domínio, o relevo demonstra-se mais entalhado, com predominância de encostas, cristas alongadas e vales encaixados. Esses padrões são característicos de áreas sujeitas a intensa dissecação fluvial e maior atuação de processos erosivos.



**Figura 37:** Mapa de classificação geomorfológica da área de estudo, gerado a partir do algoritmo *r.geomorphon*. Todas as dez classes geomorfológicas previstas pelo modelo estão representadas, embora em proporções variáveis. A classificação revela uma paisagem resultante da interação entre processos intensos de dissecação fluvial e processos deposicionais associados a ambientes fluviais de menor energia mais restritos, refletindo a complexidade da região.

A análise quantitativa desse produto demonstra a expressividade das encostas ( $2.550 \text{ km}^2$ ), que correspondem a mais 30% da área estudada. Além deste, destacam-se as cristas (incluindo as principais e secundárias) e os vales, que em conjunto cobrem aproximadamente 45% da região. Em contrapartida, as áreas planas ( $198 \text{ km}^2$ ) e as depressões ( $62 \text{ km}^2$ ) ocupam porções significativamente menores, refletindo a atuação mais restrita dos processos deposicionais, localizados sobretudo ao longo do Rio Taquari e em setores da porção sul da área de estudo, onde predomina a unidade geomorfológica Patamares da Serra Geral. A imagem abaixo (Figura 38) apresenta a visualização 3D das distribuição dos geomorphons (A), assim como as relações de áreas entre cada uma dessas classes (B) e suas respectivas proporções (C).



**Figura 38:** Representação 3D do terreno com a classificação geomorfológica e análises quantitativas de cobertura. Tem-se: (A) a visualização tridimensional do terreno com a classificação dos geomorphons, utilizando um exagero vertical de 2.5; (B) um gráfico de barras da área de cobertura de cada classe em  $\text{km}^2$ ; e (C) um gráfico da proporção percentual de cada classe. A classe "Sem Dados" refere-se a áreas desprovidas de atributos, sendo sua determinação feita pela exclusão das áreas classificadas, e não diretamente por um resultado proveniente do algoritmo processado.

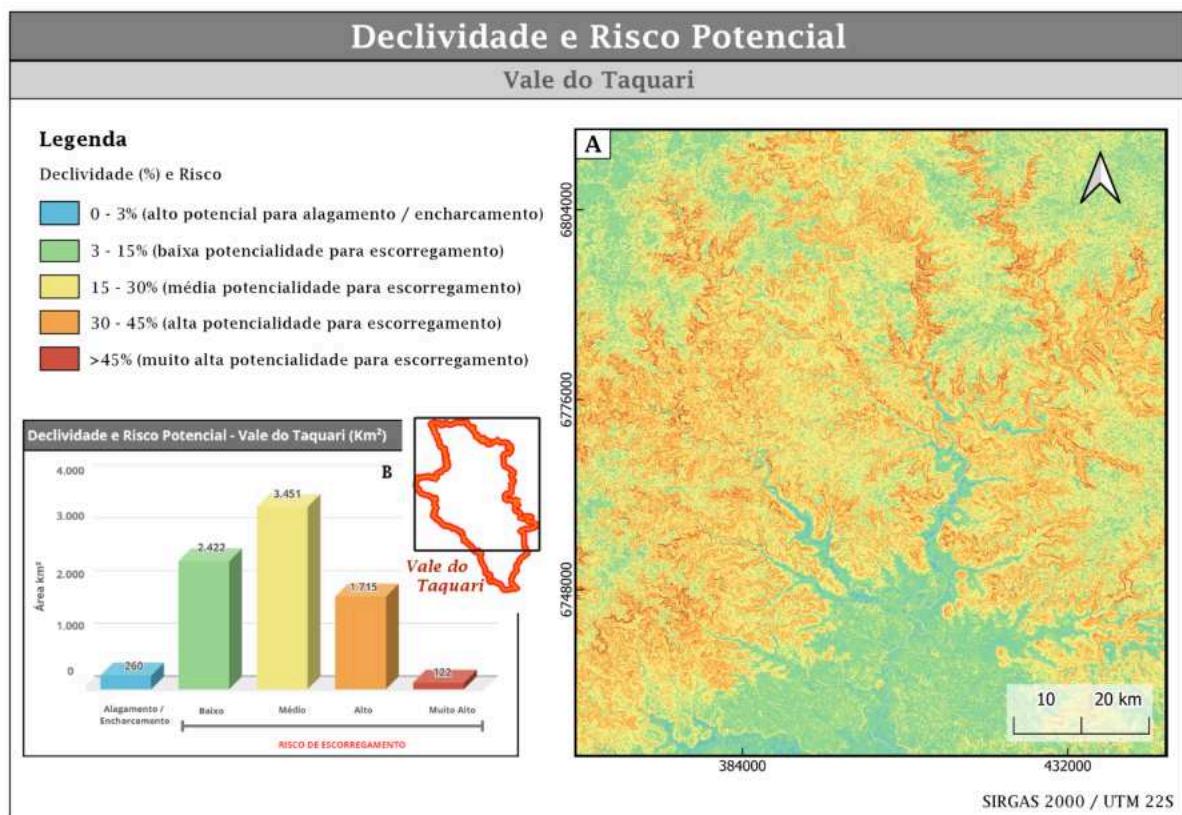
Para a análise da declividade, adotou-se a classificação proposta por Hoff, (2025), relacionando os intervalos de inclinação do terreno ao seu potencial de risco. A Figura 39 apresenta o mapa temático gerado com base nessa classificação, bem como o gráfico correspondente à distribuição espacial das classes na área de

estudo.

A partir deste produto, é possível estabelecer uma associação direta entre os níveis de declividade e o risco potencial, seja de escorregamentos ou alagamentos. Nesse contexto, áreas com declividades entre 0% e 3%, representadas em azul claro, concentram-se nos fundos de vale e planícies, estando associadas a alto potencial para alagamento ou encharcamento, em função da baixa capacidade de escoamento superficial dessas regiões. Já as demais cores refletem o crescimento gradativo do risco de escorregamentos.

As faixas intermediárias (3% a 15% e 15% a 30%) correspondem a terrenos suavemente ondulados ou encostas de inclinação moderada, com baixa a média potencialidade. Já as áreas com declividades superiores a 30%, especialmente aquelas acima de 45%, estão associadas a interflúvios e encostas mais íngremes, caracterizando-se como zonas com maior potencial de instabilidade devido à acentuada inclinação do relevo.

De forma mais específica, aproximadamente 65% da área total está concentrada nas categorias de risco médio ( $3.451\text{ km}^2$ ) e alto ( $1.752\text{ km}^2$ ), totalizando cerca de  $5.203\text{ km}^2$ . Esse dado reflete um terreno marcado por relevo acidentado, onde processos erosivos e movimentos de massa ganham mais destaque. Complementarmente, a classe de muito alto risco, que representa  $122\text{ km}^2$ , reforça a presença de setores ainda mais críticos, em termos de estabilidade.



**Figura 39:** Mapa de declividade e risco potencial, elaborado com base na classificação proposta por Hoff (2025) (A). As cores representam cinco classes de declividade associadas aos diferentes níveis de risco: áreas em azul claro (0–3%) indicam regiões planas com maior potencial para alagamentos ou encharcamentos; os tons verde e amarelo (3–30%) refletem baixa a média suscetibilidade a escorregamentos; já os tons alaranjados e vermelhos (acima de 30%) correspondem a áreas com alta a muito alta potencialidade de ocorrência desses fenômenos. O gráfico (B) complementa a análise ao mostrar essa distribuição de forma quantitativa, apresentando a predominância da classe de risco médio para escorregamentos, em amarelo.

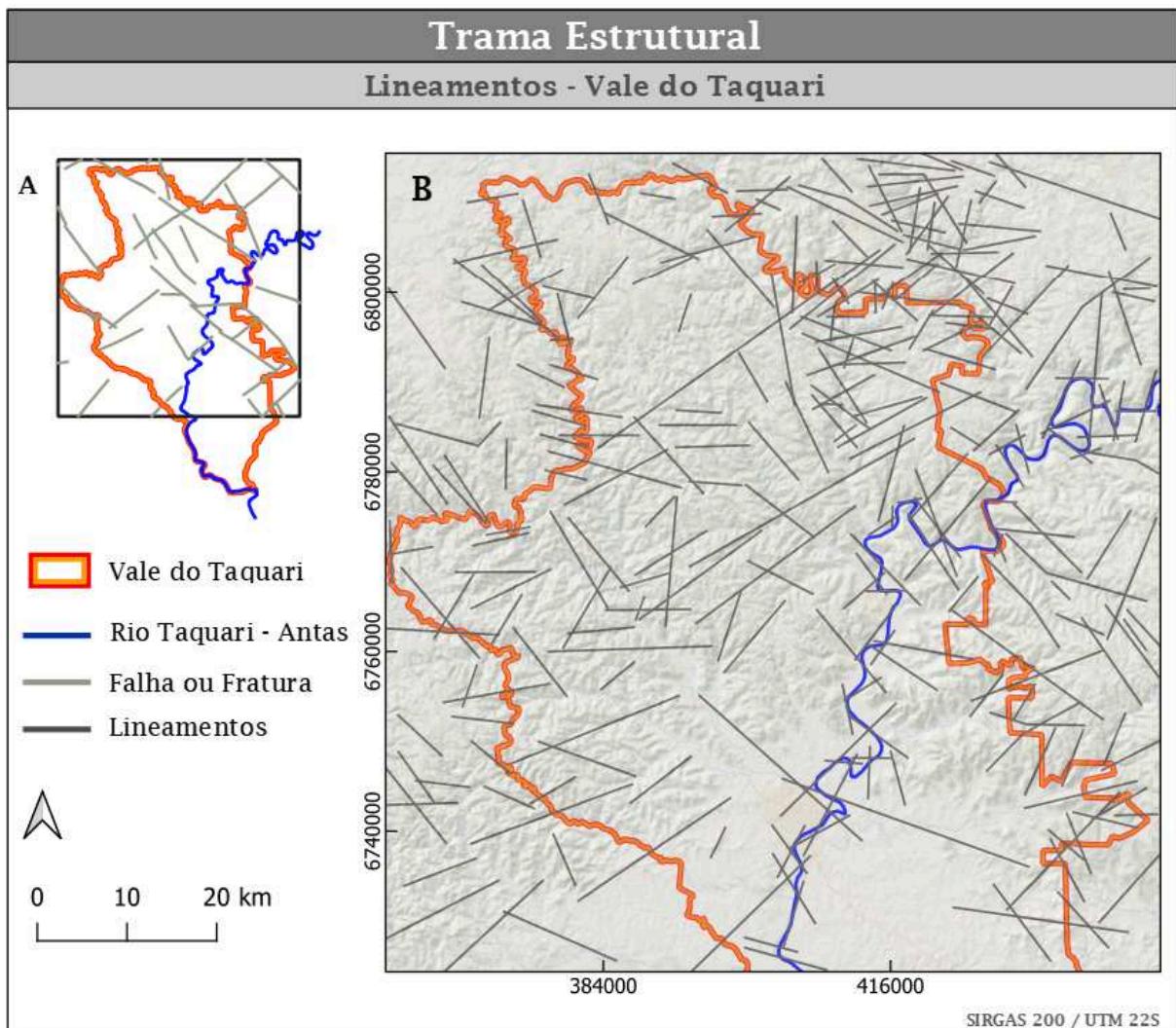
### 7.1.2 Análise de lineamentos e produto fotointerpretado

Esta seção tem por objetivo apresentar os resultados referentes ao mapeamento dos lineamentos estruturais, com foco na identificação de falhas e fraturas geológicas de forma indiscriminada. A abordagem adotada combinou a extração automática de lineamentos com posterior refinamento fotointerpretativo, permitindo identificar os principais padrões lineares, utilizados para estabelecer relações entre seu arranjo e as demais características geológicas e geomorfológicas locais. O resultado final evidencia os principais controles estruturais do terreno, contribuindo para a compreensão da influência da trama tectônica nos processos de deflagração dos movimentos de massa e na configuração da paisagem. Como forma

de completar as análises, um diagrama de rosetas foi elaborado com base na orientação dos lineamentos, assim como um mapa de densidade linear de fraturas.

A imagem abaixo (Figura 40) apresenta o resultado final do levantamento. No painel (A), estão apresentadas as falhas e fraturas identificadas anteriormente pela SGB/CPRM (Wildner *et al.*, 2008), enquanto em (B) visualiza-se a proposta desenvolvida por este trabalho, que totalizou 270 feições. Nota-se um aumento significativo na densidade e no nível de detalhamento dos lineamentos, indicando um avanço em relação ao mapeamento anterior do SGB/CPRM (de escala regional). Os lineamentos identificados seguem direções predominantes compatíveis com a estrutura regional da Bacia do Paraná, principalmente nas orientações NE-SW, NW-SE e E-W, características da tectônica pós-Gondwana. Essa correspondência com os padrões regionais reforça a consistência do produto e a eficácia da metodologia aplicada.

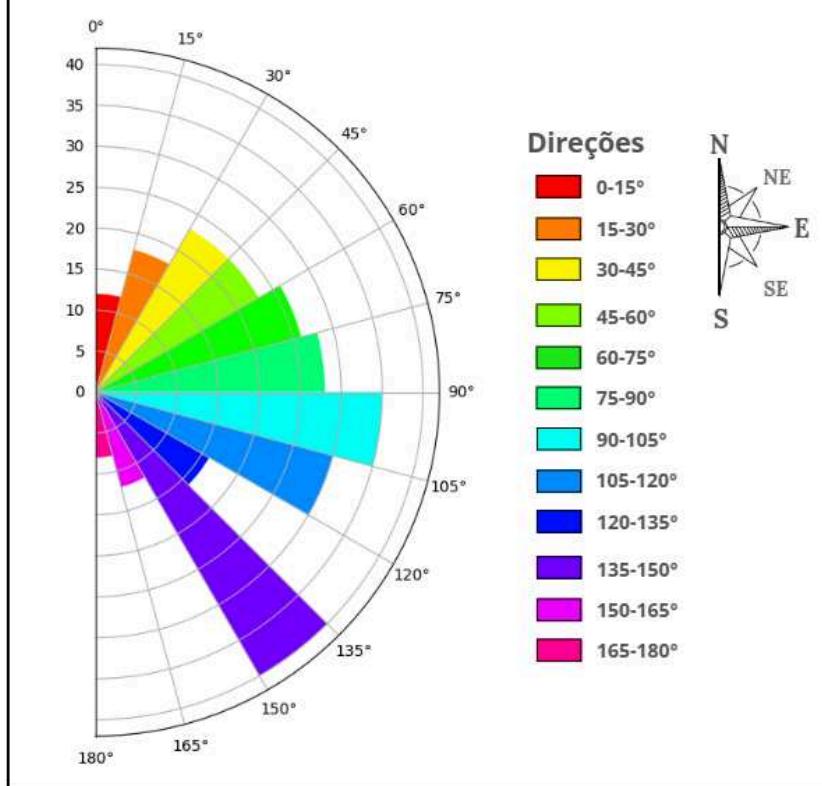
Além disso, observa-se a forte influência da estrutura geológica na morfologia da rede de drenagem, especialmente no caso do Rio Taquari-Antas (destacado em azul escuro), cujo curso acompanha zonas de fraqueza associadas a falhas e fraturas. A correspondência entre o traçado do rio e os lineamentos estruturais evidencia o controle tectônico sobre a rede hidrográfica na área de estudo, interferindo diretamente nos processos de dissecação do relevo e deposição de sedimentos. Assim, o mapeamento realizado, ao detalhar com maior precisão a trama estrutural da região, contribui para a compreensão da influência do arcabouço geológico na configuração da paisagem atual e suas possíveis associações com a deflagração dos movimentos de massa durante o evento extremo de 2024.



**Figura 40:** Trama estrutural do Vale do Taquari, em que (A) apresenta as falhas e fraturas mapeadas pela SGB/CPRM (Wildner *et al.*, 2008), e (B) os lineamentos estruturais obtidos por meio de extração automática e refinamento fotointerpretativo. Nos dois casos, a linha azul escura corresponde ao Rio Taquari-Antas, onde é possível observar a influência do controle estrutural sobre a rede de drenagem com mais clareza.

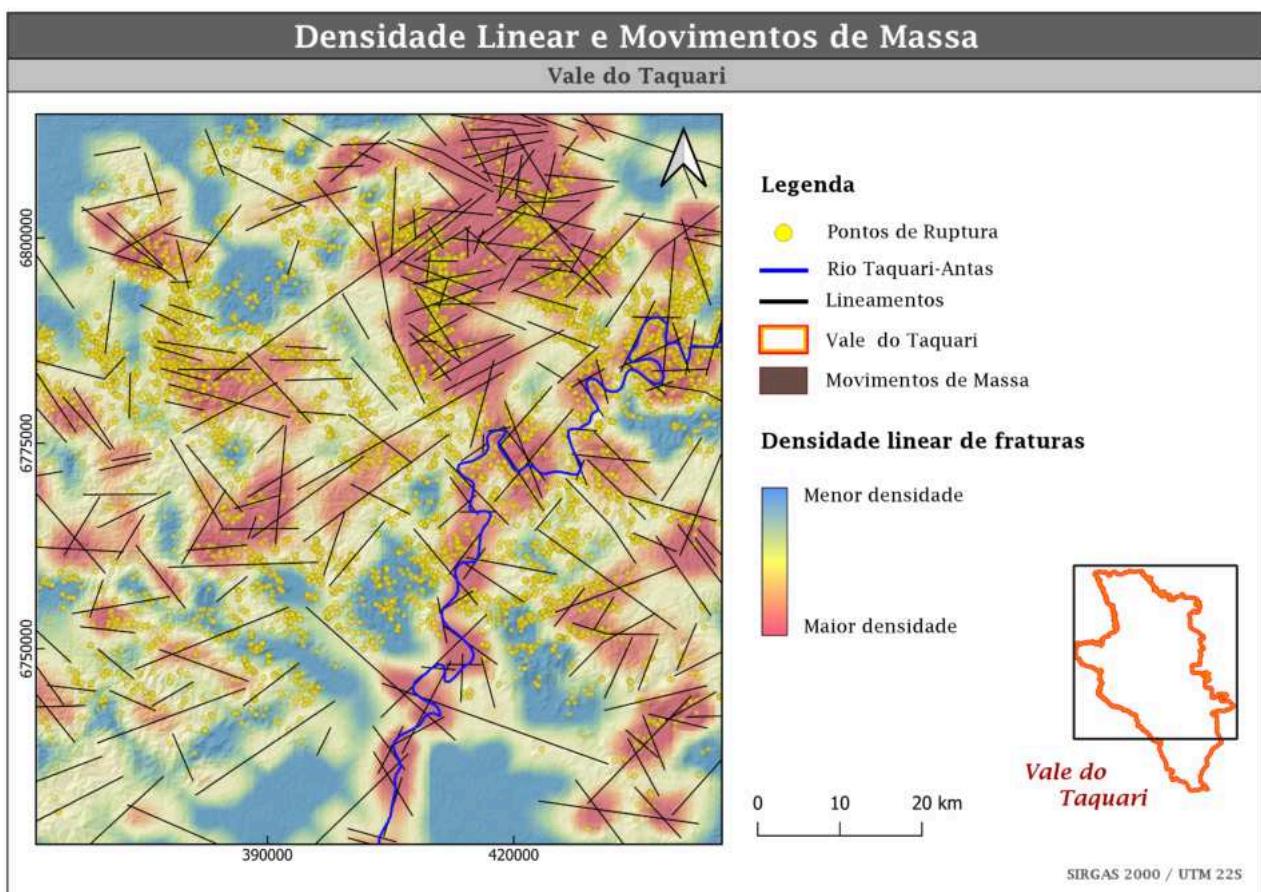
O diagrama de rosetas (Figura 41) revela a predominância de lineamentos estruturais orientados entre  $135^\circ$  e  $150^\circ$ , indicando uma forte tendência de alinhamento na direção noroeste-sudeste (NW-SE). Além disso, há também frequências significativas nos intervalos de  $90-105^\circ$  e  $60-75^\circ$ , o que sugere a existência de subordinações secundárias com direções leste-oeste (E-W) e nordeste-sudoeste (NE-SW), respectivamente.

**Diagrama de Roseta - Vale do Taquari**



**Figura 41:** Diagrama de roseta representando a frequência e orientação dos lineamentos estruturais no Vale do Taquari. O eixo angular (0° a 180°) indica a direção das feições, com 0° voltado ao norte e 180° ao sul, enquanto o eixo radial (0 a 40) expressa a quantidade de ocorrências em cada classe angular de 15°. As cores destacam os setores principais de orientação, facilitando a identificação das direções predominantes. Observa-se que o sistema de fraturamento reflete as características da geologia regional, tradicionalmente marcada por lineamentos NE-SW e NW-SE, assim como feições subordinadas de direção E-W.

O mapa de densidade linear de fraturas (Figura 42) apresenta a perspectiva da densidade de lineamentos a cada célula de 16 km<sup>2</sup>, estabelecida de acordo com a metodologia no item 6.2.1 deste documento. No mapa, a intensidade varia de azul claro (menor densidade) a vermelho (maior densidade), onde é possível observar zonas com diferentes graus de deformação rúptil, de forma comparativa.



**Figura 42:** Mapa de densidade linear de fraturas, acompanhado das distribuição dos pontos de ruptura e feições relativas aos lineamentos. A intensidade varia de azul claro (menor densidade) ao vermelho (maior densidade), configurando núcleos avermelhados onde apresentam-se as densidades relativas mais elevadas. O Rio Taquari-Antas encontra-se em azul escuro.

### 7.1.3 Análise da distribuição espacial dos movimentos de massa

O produto gerado neste eixo corresponde a um mapa de calor elaborado com base na estimativa de densidade de *kernel*, representando a concentração espacial das ocorrências de movimentos de massa. A Figura 43 apresenta esse resultado, desenvolvido a partir da camada vetorial de pontos de ruptura, conforme os dados disponibilizados por Egas *et al.* (2024).

A análise do mapa de calor apresentado na Figura 43.B permite constatar cinco zonas com densidade significativamente elevada de ocorrências (I a V), indicando assim as áreas com maior concentração de movimentos de massa na região do Vale do Taquari. Essas zonas são identificadas por meio da gradação de

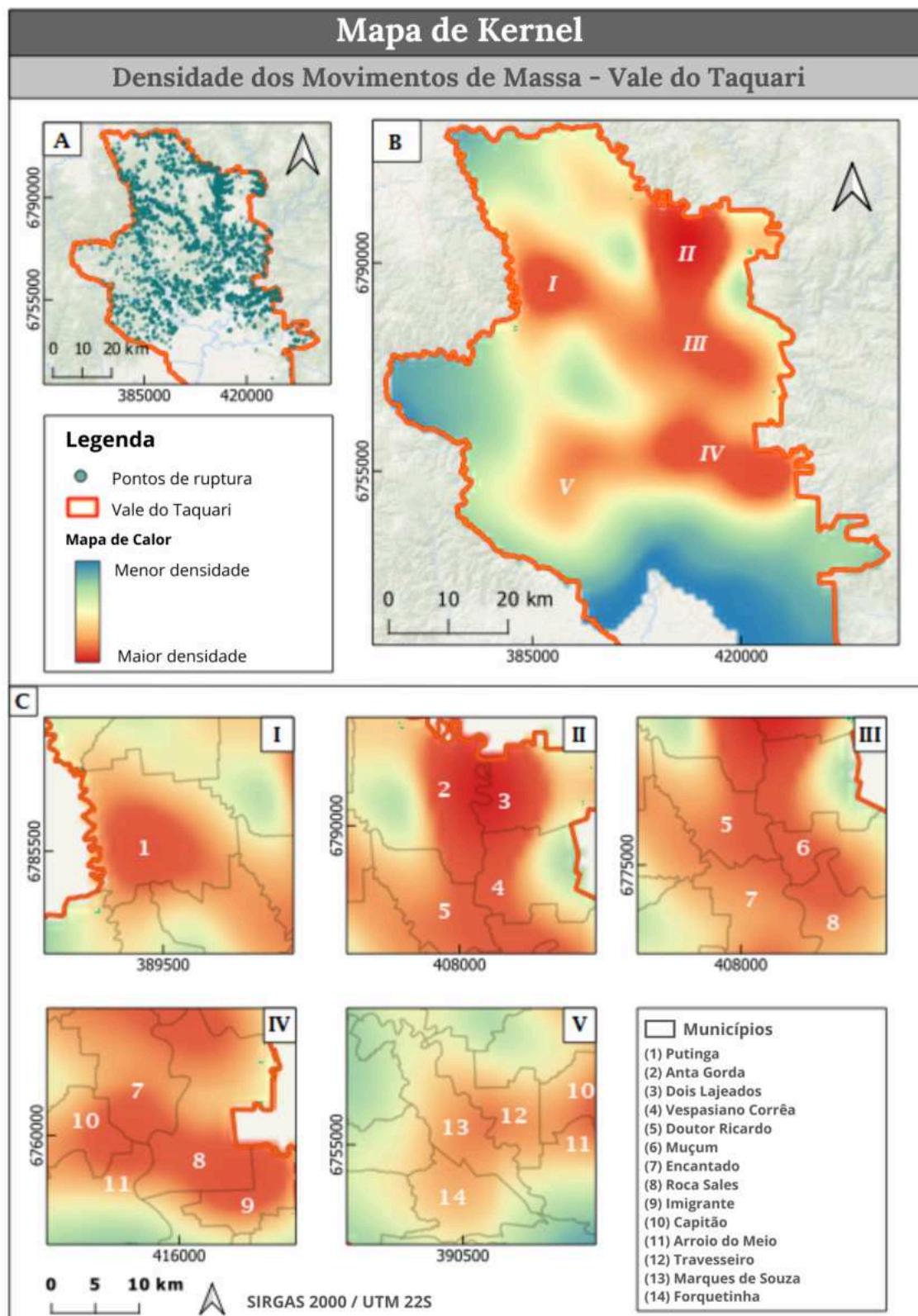
cores, de azul (menor densidade) ao vermelho (maior densidade).

No painel C, essas regiões são detalhadas de acordo com esses setores (I a V), sendo possível visualizar os municípios mais impactados. Além disso, dentre os 14 destacados, 9 coincidem com aqueles listados por Detoni *et al.* (2024) (Tabela 02), que identifica os municípios com os maiores impactos infraestruturais e humanitários registrados durante a tragédia de 2024 no Vale do Taquari.

A interpretação do mapa reforça a concentração dos movimentos de massa na porção leste-nordeste do vale, região onde se localizam alguns dos municípios mais críticos da Tabela 02. Entre eles, destacam-se:

- Roca Sales: com 13 óbitos e mais de 40% das edificações atingidas;
- Encantado: com 1 óbito e mais de 30% das edificações danificadas;
- Muçum: com mais de 50% das edificações afetadas;
- Arroio do Meio: com mais de 20% das edificações impactadas.

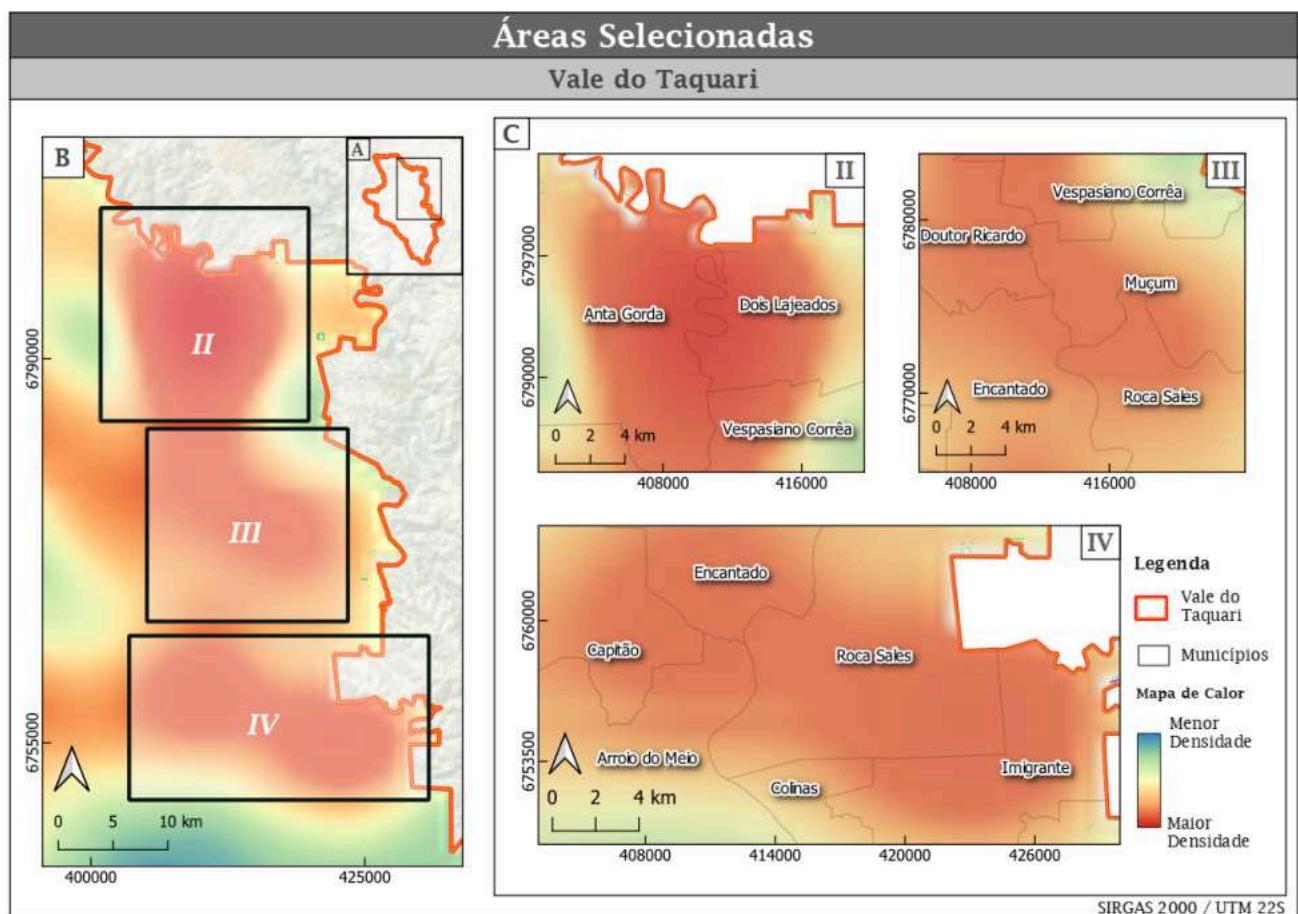
De maneira ampla, é possível identificar uma correspondência espacial consistente entre as áreas de maior densidade de eventos no mapa de calor e os municípios com maior gravidade nos impactos, evidenciando a eficácia do método como ferramenta analítica. Nesse contexto, o mapa serviu não apenas para identificar áreas críticas, mas também como base para a seleção das regiões a serem aprofundadas no capítulo seguinte, demonstrando sua utilidade prática da visualização e interpretação da distribuição espacial dos movimentos de massa por das densidades espaciais relativas.



**Figura 43:** Mapa de calor da densidade de movimentos de massa no Vale do Taquari. O painel (A) apresenta a localização dos pontos de ruptura utilizados na análise. O painel (B) mostra o resultado da estimativa de densidade por *kernel*, evidenciando cinco áreas com maior concentração de eventos. No painel (C), essas zonas são detalhadas, destacando os municípios mais afetados.

## 7.2 Análise e relação de dados

Com o objetivo de aprofundar a compreensão dos condicionantes geoespaciais dos movimentos de massa ocorridos no Vale do Taquari durante o ECE 2024 esta seção apresenta um conjunto de análises integradas, que cruzam os dados obtidos a partir da caracterização geoespacial. Os resultados têm como base a análise individual de três regiões críticas, correspondentes às áreas II, III e IV do mapa de calor, delimitadas como mostrado pela Figura 44.B, abaixo.



**Figura 44:** Visualização das sub-regiões selecionadas para análise detalhada, definidas com base no mapa de calor, em progressão de escala. O painel (A) apresenta a localização geral da área de estudo no contexto do Vale do Taquari, enquanto (B) mostra o recorte para as sub-regiões e (C) detalha cada uma dessas, evidenciando os municípios compreendidos.

As sub-regiões II, III e IV apresentam variações significativas quanto à área de abrangência, ao número de feições mapeadas e à quantidade de pontos de ruptura identificados. Além disso, a quantidade de rupturas e de geometrias dentro de uma mesma sub-região são diferentes, o que se deve ao fato de que um único polígono pode englobar múltiplos processos de deslizamento, como por exemplo pela coalescência de cicatrizes próximas. A tabela abaixo (Tabela 8) apresenta a

relação entre esses atributos, para as três sub-regiões.

Região	Área (km <sup>2</sup> )	Nº Geometrias	Pontos de Ruptura
II	369	549	611
III	323	418	442
IV	412	542	580

**Tabela 08:** Relações entre a área da sub-região com o número de pontos de ruptura e geometrias presentes.

Nesse cenário, pode-se dizer que a sub-região IV corresponde à maior extensão territorial (412 km<sup>2</sup>), seguida da II (369 km<sup>2</sup>) e da III (323 km<sup>2</sup>). Apesar de possuir uma área intermediária, a sub-região II concentra o maior número de geometrias (549) e de pontos de ruptura (611), o que indica uma elevada densidade de movimentos de massa e de coalescência múltipla de processos. Em contrapartida, a sub-região III apresenta a menor área, registrando também os menores números absolutos, tanto de geometrias (418) quanto de rupturas (442).

Apesar de a análise preliminar indicar que a sub-região III apresenta valores inferiores, em comparação às sub-regiões II e IV, esse resultado não reflete, de forma completa, a gravidade dos impactos socioeconômicos provocados pelo ECE 2024. Na realidade, a sub-região III registrou níveis alarmantes de prejuízos humanos e materiais, sobretudo nos municípios de Roca Sales, Encantado e Muçum. Conforme os dados de Detoni *et al.* (2024), esses municípios contabilizaram, ao todo, 14 óbitos e 5 desaparecidos, sendo que Roca Sales e Muçum apresentaram mais de 40% de suas edificações afetadas por inundações. Ressalta-se, ainda, que a sub-região IV abrange a porção sul de Roca Sales e Encantado, concentrando focos de elevada densidade de eventos.

No que diz respeito à extensão dos movimentos de massa, a base de dados disponibilizado por Egas *et al.* (2024) também permitiu extrair outros dados, como a área total, a relação entre mínimo e máximo, a média e a mediana, sendo este quadro apresentado na Tabela 09. Com base nesses dados, observa-se que há variações relevantes na extensão dos movimentos de massa entre as sub-regiões II, III e IV. A sub-região IV concentra a maior área total afetada (4,9 km<sup>2</sup>), seguida pela sub-região II (3,6 km<sup>2</sup>) e, por fim, a sub-região III (3,3 km<sup>2</sup>). No entanto, quando se analisa a extensão máxima individual dos movimentos, percebe-se um aumento expressivo da sub-região II (93.173 m<sup>2</sup>) para a sub-região IV (250.400 m<sup>2</sup>), revelando

que esta última abriga os eventos mais extensos da amostra. Por outro lado, a extensão mínima é significativamente menor na sub-região IV ( $80 \text{ m}^2$ ), sugerindo uma alta amplitude da variação dos tamanhos de cicatrizes. Além disso, pode-se dizer que a média das extensões cresce progressivamente entre as sub-regiões,  $7.000 \text{ m}^2$  (II),  $8.000 \text{ m}^2$  (III) e  $9.000 \text{ m}^2$  (IV), enquanto a mediana permanece relativamente constante, em torno de  $3.000$  a  $4.000 \text{ m}^2$ . Essa diferença entre média e mediana, especialmente nas sub-regiões III e IV, indica a presença de valores extremos que elevam a média, refletindo a ocorrência de deslizamentos de grande porte em meio a uma maioria de eventos relativamente menores. Esses apontamentos reforçam a complexidade espacial e a heterogeneidade dos processos de movimentos de massa no terreno dentre as diferentes porções analisadas do Vale do Taquari.

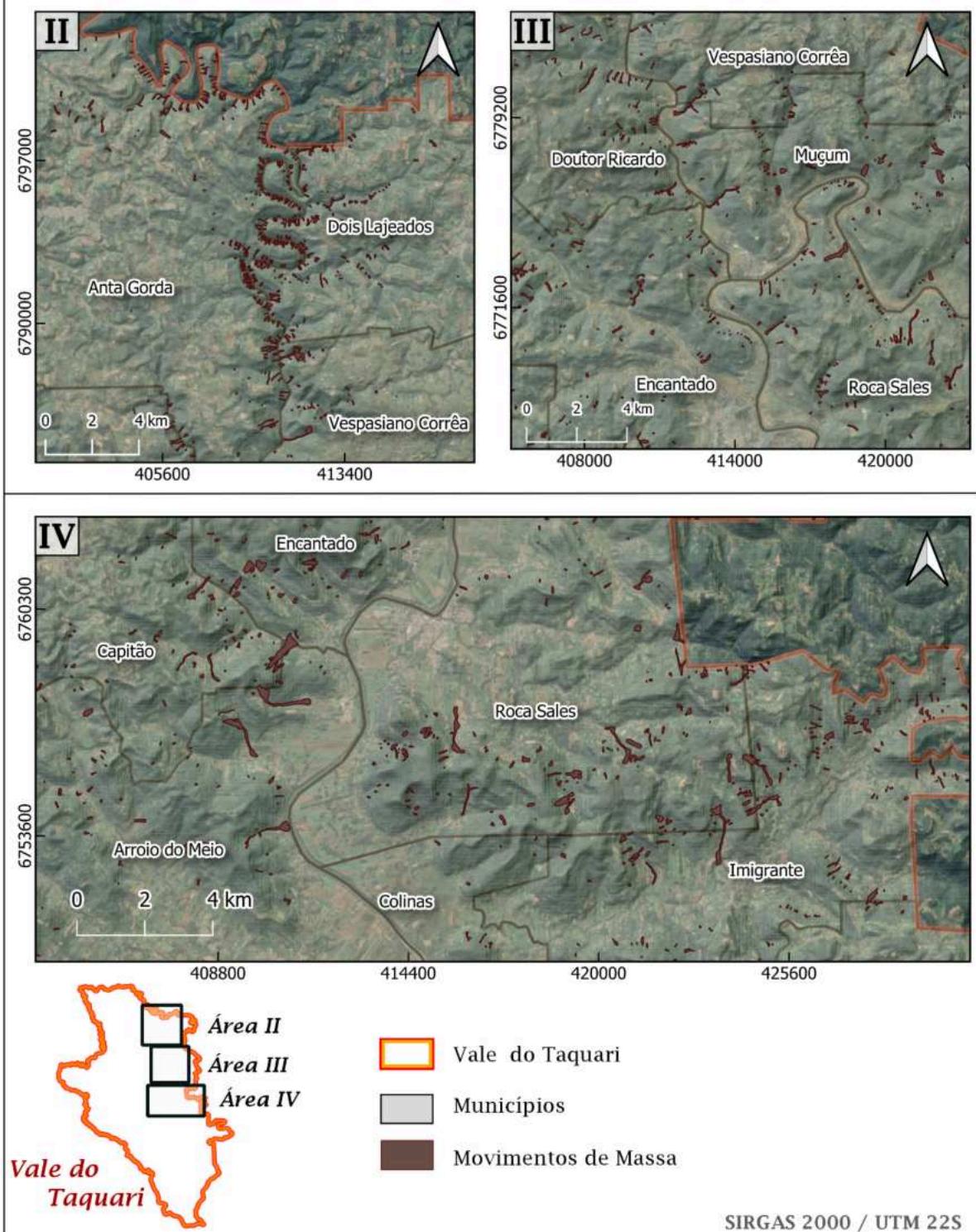
Região	Área total dos movimentos de massa ( $\text{km}^2$ )	Extensão mínima ( $\text{m}^2$ )	Extensão máxima ( $\text{m}^2$ )	Média ( $\text{m}^2$ )	Mediana ( $\text{m}^2$ )
II	3,6	333	93.173	7.000	4.000
III	3,3	270	169.700	8.000	3.000
IV	4,9	80	250.400	9.000	3.000

**Tabela 09:** Descrição de dados quantitativos e estatísticos para as sub-regiões, considerando a área total, a relação entre mínimo e máximo, a média e a mediana.

Como forma de apresentar a distribuição dos movimentos de massa sob outra perspectiva, a Figura 45 exibe mapas que representam a geometria dessas ocorrências sobre o território, com a inclusão dos limites municipais. Observa-se que a Região II concentra a maioria dos registros ao longo de um dos canais fluviais, caracterizado por traçado sinuoso e relevo fortemente entalhado. Por outro lado, as Regiões III e IV apresentam uma distribuição mais ampla e dispersa dos movimentos, sugerindo diferentes condicionantes geomorfológicos, estruturais e hidrológicos.

## Sub-regiões do Vale do Taquari

### Distribuição dos Movimentos de Massa



**Figura 45:** Contexto de distribuição dos movimentos de massa, dispondo a geometria destes em meio as sub-regiões II, III e IV, assim como seus principais municípios envolvidos.

Na próxima seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise individual dessas sub-regiões e suas respectivas geometrias sob ótica dos produtos da caracterização geoespacial, oferecendo um embasamento para traçar um panorama mais robusto sobre os fatores que contribuíram para a ocorrência dos movimentos de massa em cada uma destas. As análises estão organizadas em duas partes principais:

- Padrões geomorfológicos e declividade do terreno: apresenta a proporção das classes de geomorphons nas zonas de maior densidade de movimentos de massa, possibilitando a identificação dos padrões morfológicos mais recorrentes nessas áreas. Além disso, analisa-se a declividade nessas regiões, permitindo relacionar os diferentes níveis de inclinação do terreno ao seu potencial de risco.
- Trama estrutural e deflagração dos processos: analisa a orientação das estruturas geológicas da área de estudo por meio da relação entre a orientação dos lineamentos com a densidade linear de fraturas (Figura 41), discutindo as possíveis influências da trama estrutural local na deflagração dos movimentos de massa.

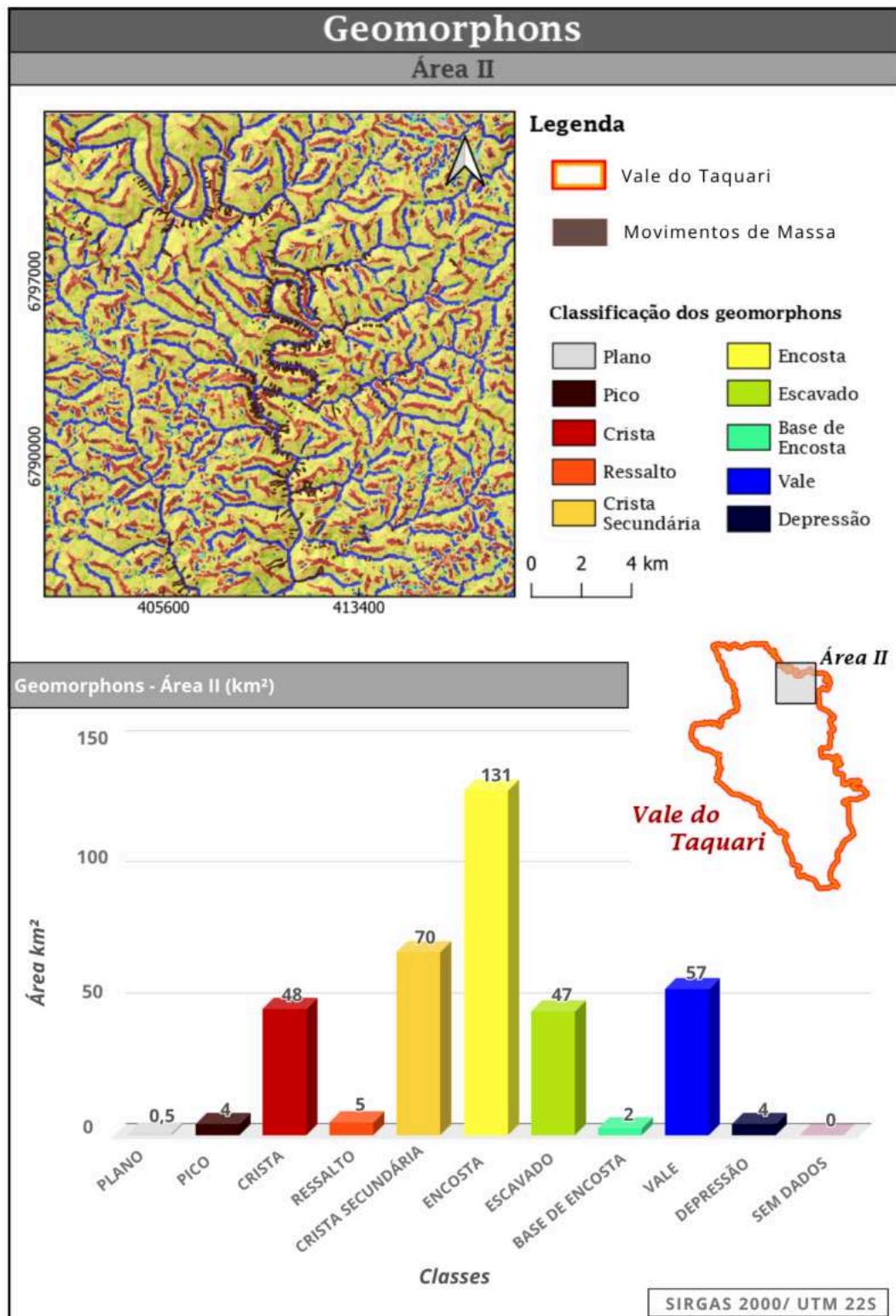
Essas abordagens complementam a análise espacial preliminar já apresentada, permitindo uma interpretação integrada dos fatores morfodinâmicos que atuam sobre o território afetado.

### 7.2.1 Padrões geomorfológicos e declividade do terreno

Este tópico abrange o contexto geomorfométrico para as áreas selecionadas, envolvendo o cenário de ocorrências dos movimentos de massa, dispondo as geometrias das cicatrizes.

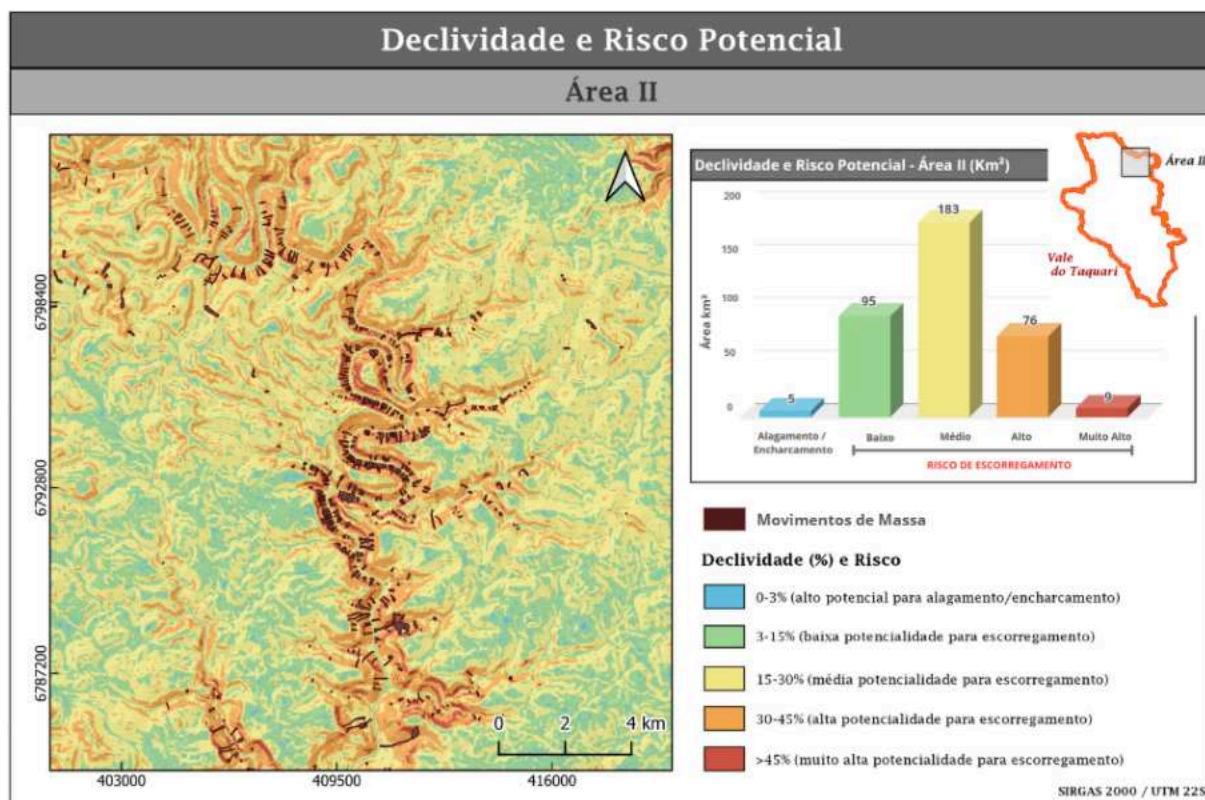
A Figura 46 apresenta a Área II do Vale do Taquari sob a perspectiva da relação entre às classes de geomorphons e a distribuição das cicatrizes. O mapa é acompanhado de um gráfico que aborda a área de cada classe no território, sendo possível observar a predominância das encostas, que correspondem a 131 km<sup>2</sup>, o que indica terrenos inclinados e potencialmente instáveis. Em seguida, sucedem as classes "Crista Secundária" com 70 km<sup>2</sup>, "Vale" com 57 km<sup>2</sup> e "Crista" com 48 km<sup>2</sup>, evidenciando um relevo bem compartimentado, com presença significativa de divisores de água e áreas de drenagem concentrada. A Figura 46 apresenta o mapa da distribuição de geomorphons, junto ao gráfico que dispõe a contribuição de cada

classe na Área II (em km<sup>2</sup>)



**Figura 46:** Caracterização geomorfométrica e movimentos de massa na Área II do Vale do Taquari a partir da perspectiva de unidades morfológicas (geomorphons), evidenciando a predominância de formas associadas a encostas, cristas e vales nas regiões com maior densidade de rupturas.

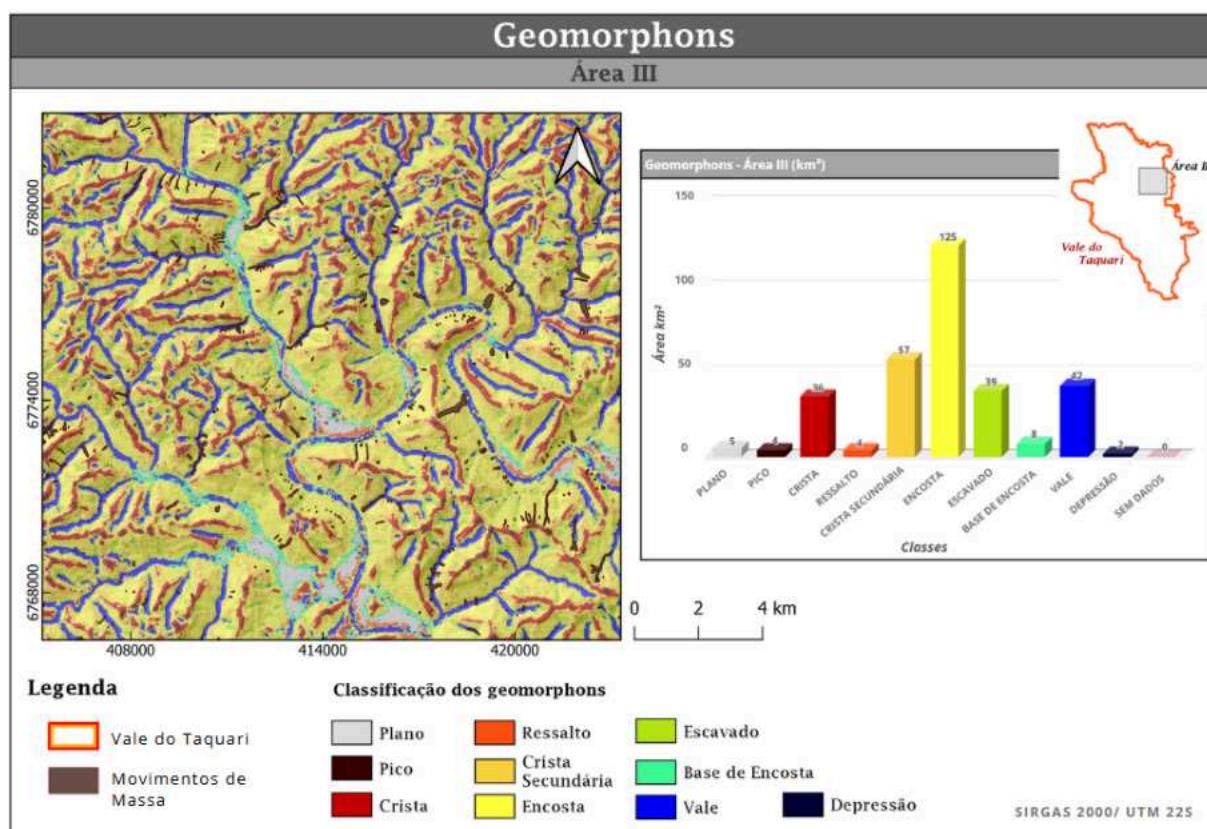
Em relação à declividade, observa-se que a Área II (Figura 47) é majoritariamente classificada como de risco médio para escorregamentos, abrangendo 183 km<sup>2</sup>, o que representa quase metade do território total analisado (369 km<sup>2</sup>). As categorias de risco alto e muito alto somam 85 km<sup>2</sup>, indicando zonas críticas com elevada suscetibilidade a escorregamentos. Nessas áreas, concentra-se a maior parte das ocorrências registradas durante o Evento Climático Extremo (ECE) de 2024, especialmente ao longo do canal central sinuoso, onde o relevo é mais entalhado. Por fim, a classe de alagamento/encharcamento, com apenas 5 km<sup>2</sup>, refere-se a áreas mais planas, possivelmente associadas à presença de açudes ou áreas de retenção hídrica. A imagem referente a Figura 47 dispõe a relação entre declividade e risco potencial, com a presença da distribuição das classes em km<sup>2</sup> no gráfico adjacente.



**Figura 47:** Distribuição das classes a partir da perspectiva de declividade e risco potencial para sub-região II, evidenciando a predominância de risco médio a escorregamentos.

Na Área III, a classe dominante é “Encosta”, com uma cobertura de 125 km<sup>2</sup>, valor próximo ao observado na Área II (131 km<sup>2</sup>), indicando também certa continuidade morfológica entre outros atributos nas duas regiões. Nesse sentido, pode-se dizer que ambas apresentam expressivas extensões das classes “Crista”, “Crista Secundária” e “Vale”, que apesar de apresentarem menor contribuição na

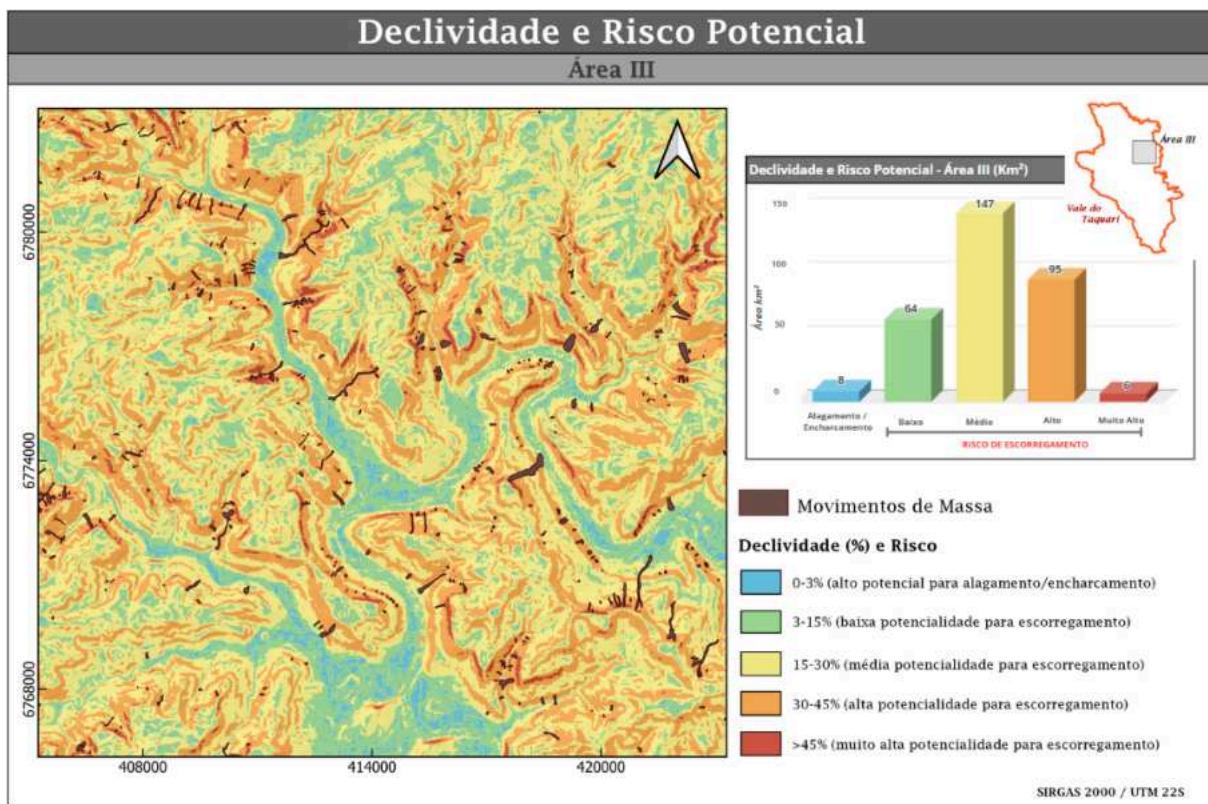
sub-região III, reforçam um padrão de relevo compartmentado. Já para áreas planas, estas demonstram-se mais presentes na Área III ( $5 \text{ km}^2$ ), especialmente em planícies de inundações e ao longo do curso do Rio Taquari, sendo um valor significativamente superior ao da Área II, onde essa classe não ultrapassa  $1 \text{ km}^2$ . Este dado pode indicar variações locais nos processos de modelagem do relevo, proporcionados por condicionantes como de origem geológica-estrutural, com implicações na dinâmica de evolução da paisagem. A imagem abaixo (Figura 48) apresenta a distribuição dos geomorphons na Área III, sendo acompanhado do gráfico relativo à contribuição de cada classe (em  $\text{km}^2$ ).



**Figura 48:** Distribuição dos geomorphons e geometrias dos movimentos de massa na Área III do Vale do Taquari, evidenciando semelhanças de padrão morfológico com a sub-região II, associado a predominância de encostas, cristas (primárias ou secundárias) e vales nas regiões com maior densidade de rupturas. Apesar de ser possível estabelecer correlações consistentes entre a proporção dos geomorphons, a Área III apresenta um aumento significativo de áreas planas, principalmente relacionadas a planícies de inundações e, de forma mais restrita, ao curso do Rio Taquari.

A relação entre declividade e risco potencial na Área III apresenta padrões semelhantes aos observados na Área II, com predominância das classes associadas ao risco de escorregamentos em relação às áreas suscetíveis a alagamentos ou

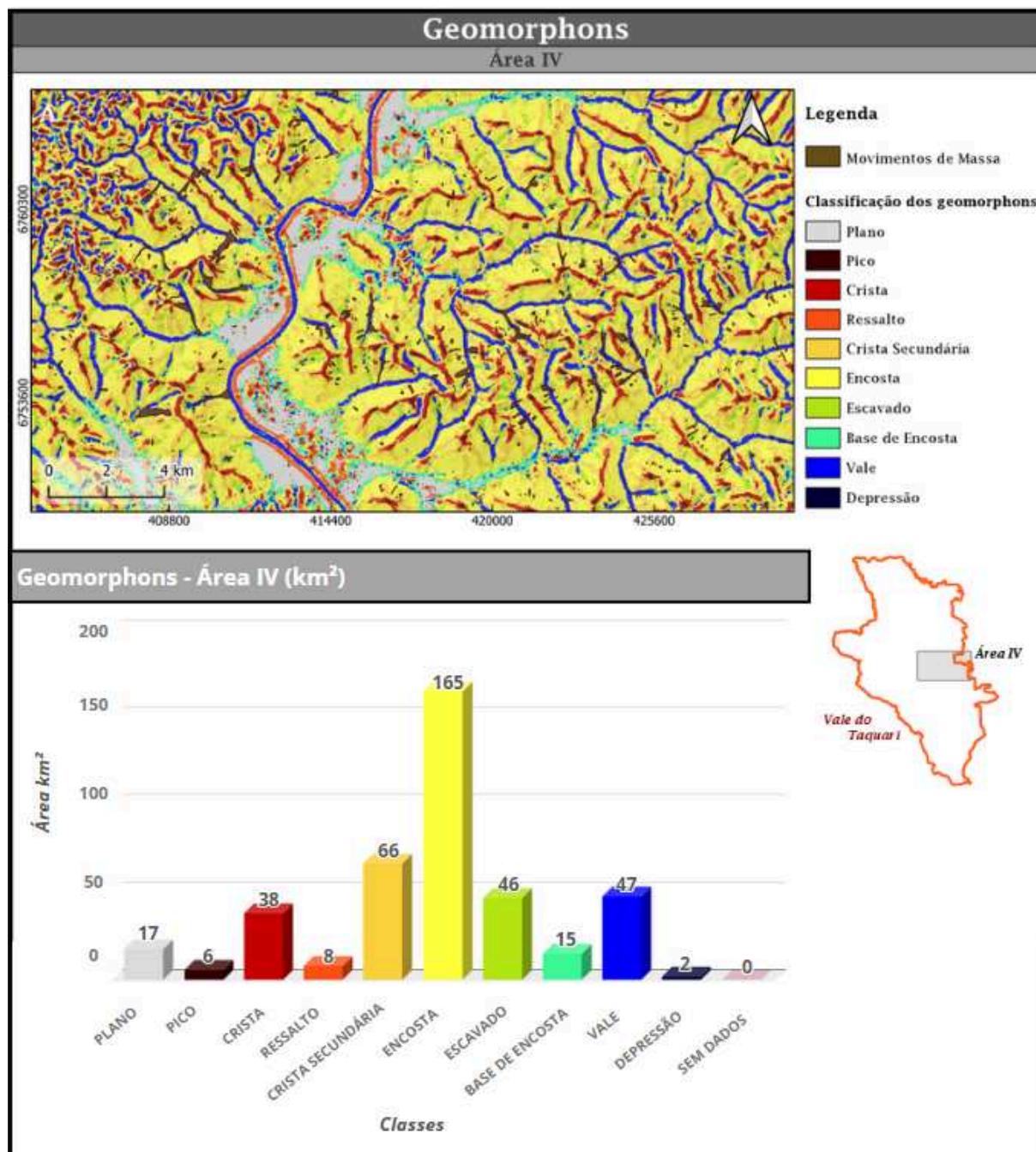
encharcamentos. Além disso, nota-se uma redução relativa nas áreas classificadas como risco baixo e médio, acompanhada por um aumento expressivo da classe de risco alto, que atinge 95 km<sup>2</sup>, indicando um agravamento nas condições de instabilidade em certos setores da sub-região. Por fim, destaca-se que, embora os movimentos de massa continuem concentrados em áreas de risco médio a muito alto, sua distribuição espacial na Área III é mais dispersa, refletindo uma maior complexidade na interação entre morfologia do relevo e processos desencadeados durante eventos extremos. A Figura 49 dispõe o mapa de declividade e risco potencial, associado ao gráfico de distribuição das classes, em km<sup>2</sup>.



**Figura 49:** Distribuição das classes a partir da perspectiva de declividade e risco potencial para sub-região II, evidenciando a predominância de risco médio a escorregamentos.

Em comparação com as sub-regiões anteriormente analisadas, a Área IV destaca-se por sua maior extensão territorial e pela maior representatividade do Rio Taquari, observando-se também o aumento relativo da faixa ocupada pela planície de inundação e das demais áreas planas, que totalizam aproximadamente 17 km<sup>2</sup>. Embora as classes “Encosta”, “Crista” e “Vale” continuem com valores significativos, compatíveis com o padrão morfológico presente nas Áreas II e III, verifica-se uma redução proporcional dessas feições em relação às demais áreas. A Figura 50 ilustra esse contexto por meio do mapa de geomorphons, evidenciando a interação entre a

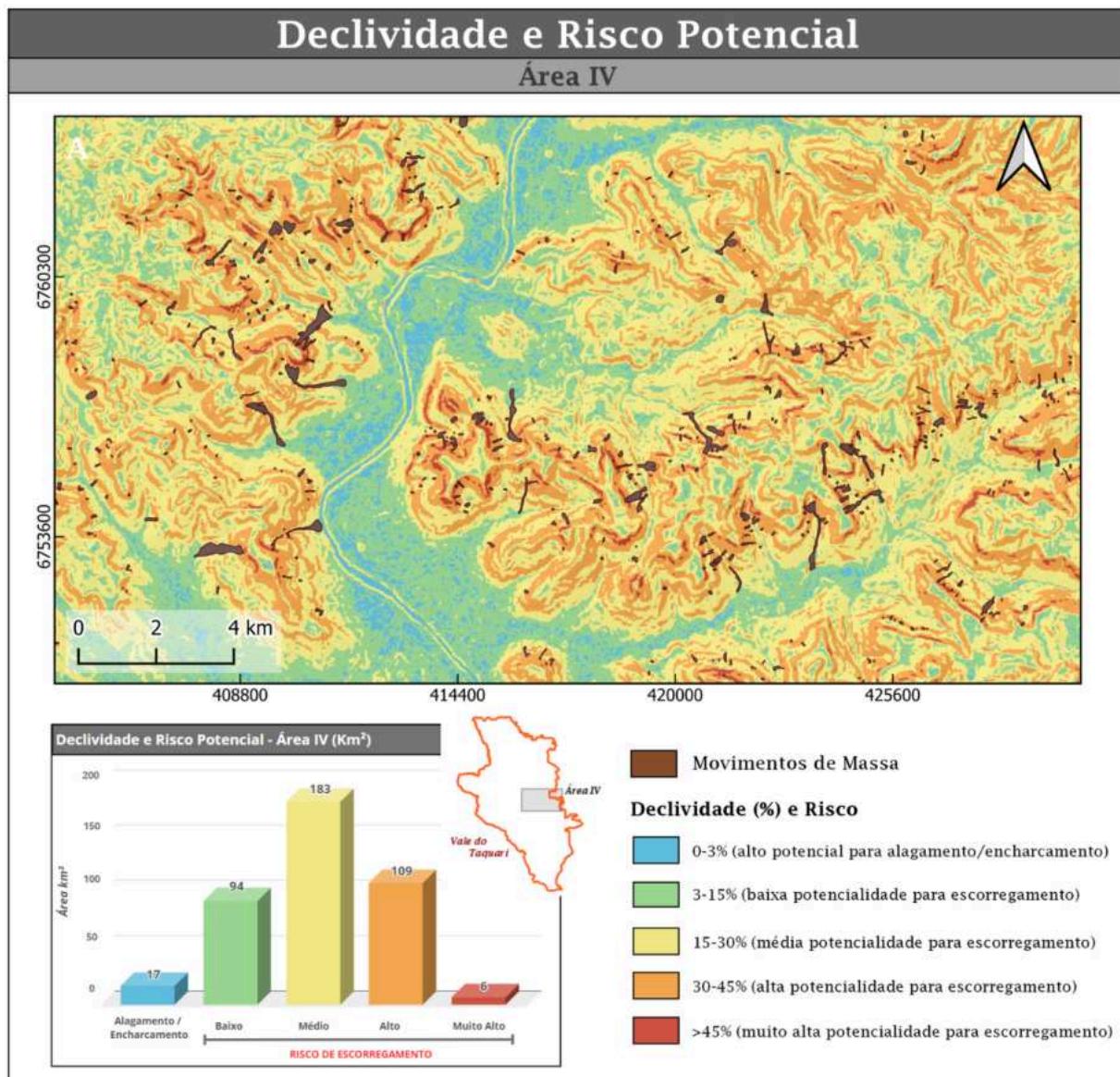
compartimentação do relevo e os movimentos de massa, com a distribuição quantitativa das classes apresentada no gráfico abaixo deste.



**Figura 50:** Distribuição dos geomorphons e movimentos de massa na Área IV do Vale do Taquari, evidenciando semelhanças com as sub-regiões II e III, apesar do aumento significativo das faixas ocupadas por planícies de inundação e demais áreas planas.

No que se refere à relação entre declividade e risco potencial, a Área IV mantém o padrão observado nas demais sub-regiões, com a maior parte dos movimentos de massa deflagrados em áreas a partir do nível de risco médio para escorregamentos. Além disso, observa-se a atuação predominante desses

processos em encostas que, em muitos casos, convergem para planícies de inundação ou canais estreitos, intensificando os impactos em áreas de transição morfológica. A Figura 51 apresenta esse contexto por meio do mapa de risco potencial, acompanhado de um gráfico com a distribuição das classes por área ( $\text{km}^2$ ).



**Figura 51:** Distribuição das classes relacionadas a declividade e risco potencial para sub-região IV, com aumento relativo das áreas sujeitas a alagamentos/encharcamentos em relação às demais. Além disso, o risco médio a escorregamentos continua predominante.

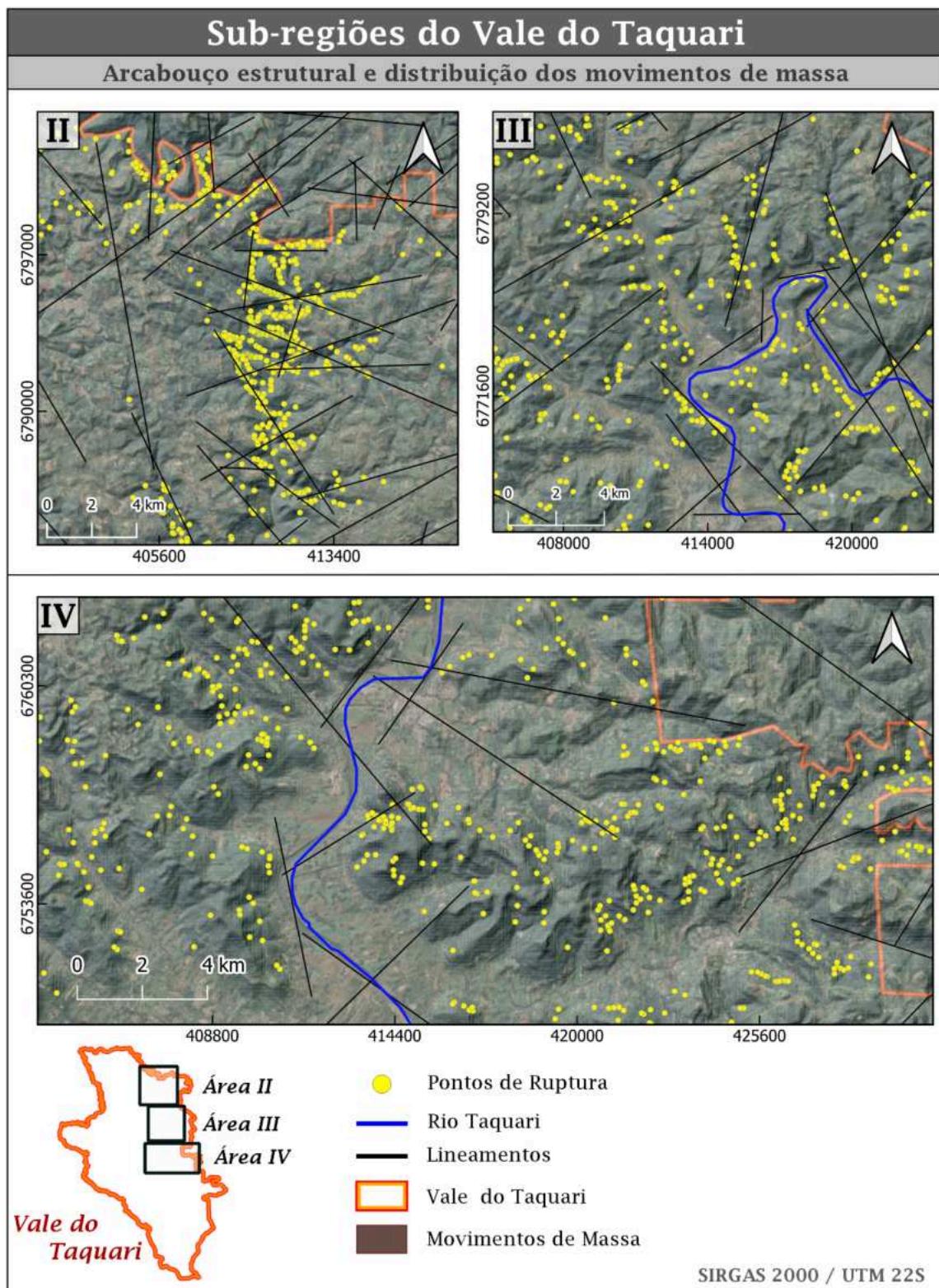
### 7.2.2 Trama estrutural e deflagração dos processos

Embora o Vale do Taquari apresente uma tendência clara de orientação estrutural, com predominância de lineamentos nas direções NW–SE e NE–SW e

E-W, as sub-regiões analisadas revelam variações significativas na distribuição espacial e na densidade linear dessas feições. Além disso, de maneira geral, os lineamentos na direção E-W são pouco expressivos, embora, quando presentes, coincidam com o traçado de drenagens, evidenciando controle estrutural.

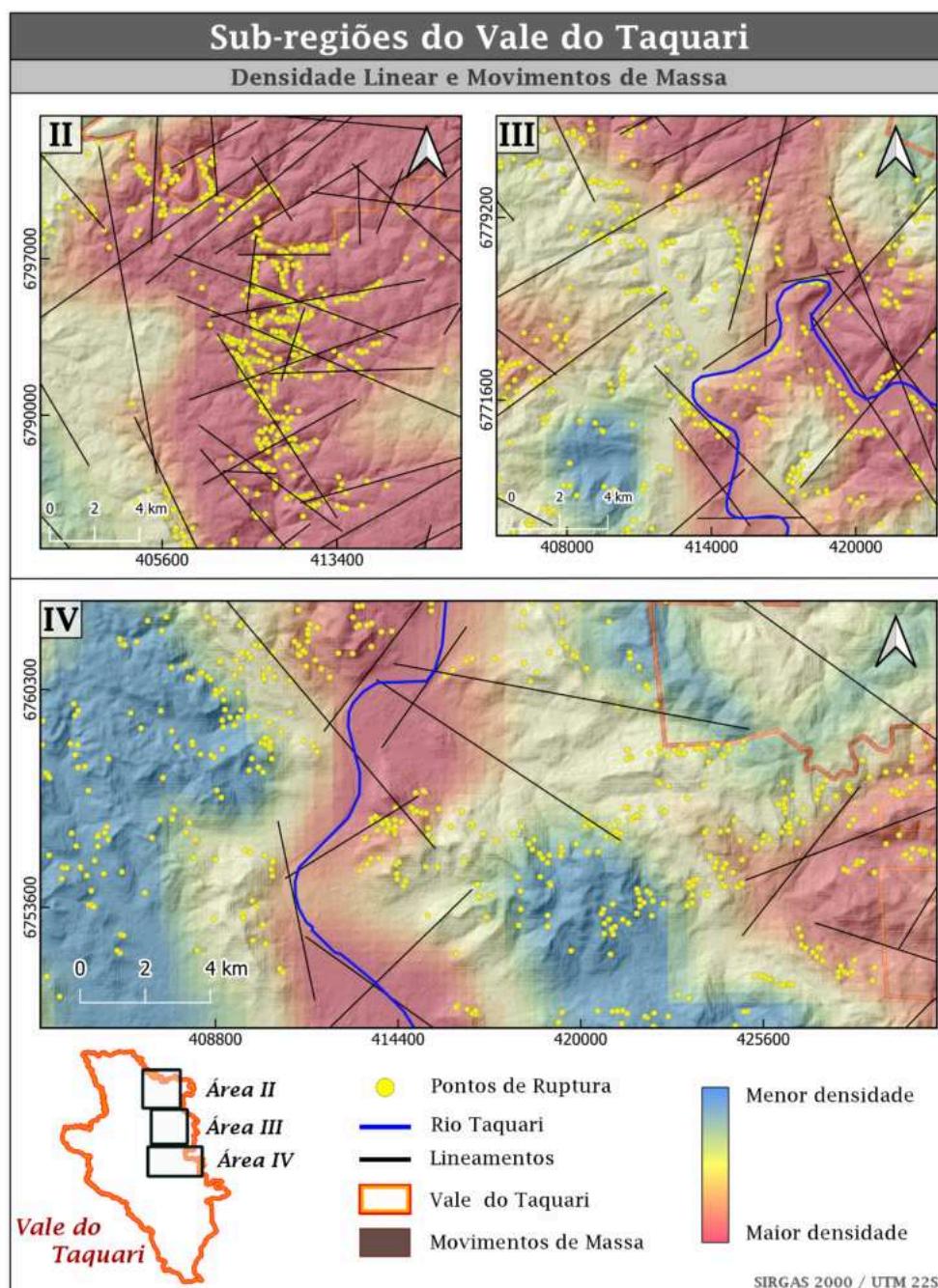
Na Área II, destaca-se um vale central sinuoso, fortemente condicionado por feições estruturais, evidenciado pela presença de drenagens encaixadas e cristas alinhadas, características de compartimentos morfoestruturais controlados por falhas e fraturas. Na sub-região III, demonstra-se que o Rio Taquari apresenta mudanças abruptas na direção do canal, diretamente associadas à orientação dos lineamentos. Observa-se também a presença de lineamentos extensos e bem distribuídos ao longo de toda a área, indicando um sistema estrutural complexo. Já na sub-região IV, as feições estruturais estão principalmente vinculadas ao traçado do Rio Taquari, embora também existam na porção sudeste. A imagem referente a Figura 52 proporciona a visualização dos lineamentos em conjunto dos pontos de ruptura mapeados por Egas *et al.* (2024), proporcionando estabelecer correlações entre a distribuição e densidade das feições estruturais com o posicionamento da deflagração dos movimentos de massa de maneira generalizada.

De modo geral, a Área II apresenta a maior densidade de lineamentos estruturais, associada a altitudes elevadas e a um relevo intensamente dissecado, composto por vales profundos, drenagens encaixadas e encostas íngremes. Essa configuração geomorfológica evidencia um forte controle estrutural sobre a morfologia do terreno, que favorece a deflagração de processos gravitacionais. Durante o ECE 2024, essa sub-região registrou a maior densidade de rupturas por movimentos de massa, com destaque para a coalescência destes em áreas de forte declividade. No entanto, a extensão total dessas rupturas foi relativamente inferior à observada nas demais áreas, o que sugere que, embora os movimentos tenham ocorrido com alta frequência e proximidade, foram em sua maioria de menor magnitude, condicionados por restrições como a menor espessura do solo em meio geomecânica das vertentes.



**Figura 52:** Distribuição dos pontos de ruptura e lineamentos estruturais para as sub-regiões, indiscriminados entre falhas e fraturas. Em azul, é possível observar o Rio Taquari, que reflete a dinâmica do arcabouço estrutural da região do vale. A partir desse produto é possível discutir informações tais como distribuição e densidade de lineamentos e pontos de ruptura.

A imagem abaixo (Figura 53) apresenta a densidade linear de fraturas para as três sub-regiões. A partir deste, é possível verificar a relação entre a intensidade de ocorrência dessas feições e a deflagração dos movimentos de massa, de forma mais expressiva, nas áreas II e III.



**Figura 52:** Distribuição dos pontos de ruptura e lineamentos estruturais para as sub-regiões, associados a densidade linear de fraturas. A partir desse produto, é possível correlacionar visualmente áreas de maior proporção de movimentos de massa em meio a altas densidades de lineamentos, principalmente nas sub-regiões II e III.

### 7.3 Tendências climáticas recentes

As tendências climáticas apresentadas nesta seção baseiam-se em produtos desenvolvidos entre o período de 2000 a 2024, com o objetivo de analisar as variações de precipitação, temperatura e evapotranspiração ao longo desse intervalo temporal na região do Vale do Taquari. Essa abordagem é complementada pela visualização dos anos de ocorrência dos eventos hidrológicos extremos nesses 24 anos, considerando especialmente as tragédias de 2020, 2023 e 2024. A relevância deste estudo reside na constatação científica de que a frequência e a intensidade desses eventos têm refletido os efeitos das mudanças climáticas globais (como analisado por ANA, 2025; e Detoni *et al.*, 2024), oferecendo subsídios importantes para a compreensão das tendências recentes e suas implicações sobre os sistemas socioambientais regionais.

O climograma do Vale do Taquari entre os anos de 2000 a 2024 evidencia uma significativa variabilidade interanual tanto na precipitação como na temperatura média. Na Figura 53, as barras em azul-claro mostram que a precipitação oscilou consideravelmente, sendo possível observar os anos mais chuvosos, como em 2002, 2014, 2015 e 2024, superando os 2200 mm, contrastando com anos mais secos como 2004, 2006 e 2008, com valores abaixo de 1500 mm. Já a linha laranja revela uma variação da temperatura média entre, aproximadamente, 22 e 25 °C, com seu ápice no ano de 2005. Essa elevação da temperatura coincide, em alguns anos, com reduções de precipitação, o que pode indicar períodos de seca ou maior evapotranspiração, afetando o balanço hídrico. Embora não exista uma correlação direta em todos os anos, o gráfico permite analisar padrões em menor escala temporal (como o aumento da temperatura entre 2016 e 2020) e anomalias evidentes (como precipitações elevadas ou extremamente baixas).

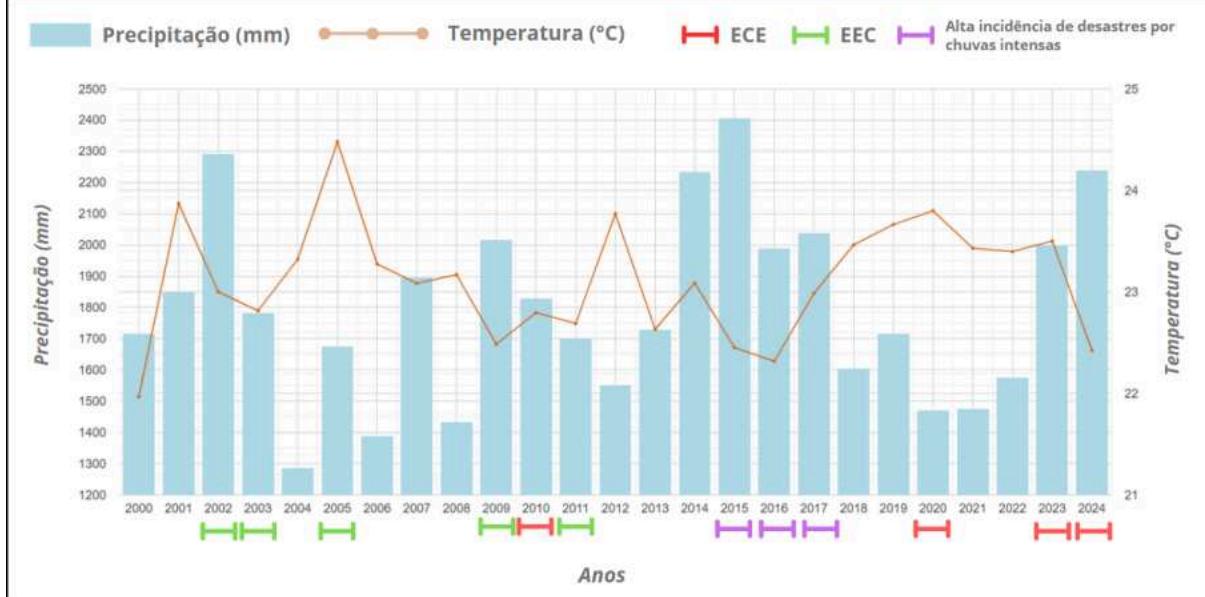
Além desses fatores, o climograma da Figura 53 também destaca os anos de ocorrência de Eventos Climáticos Extremos (ECE's) e Eventos Extremos de Cheias (EEC's), conforme documentado por Marengo *et al.* (2024); Righi; Robaina, 2010; e Teixeira; Prieto (2020). Segundo estes últimos, os EEC's caracterizam-se, essencialmente, pelas relações entre intensidade, duração e abrangência espacial da precipitação. A sua ocorrência está condicionada ao nível de umidade, ao grau de instabilidade atmosférica e às particularidades cinemáticas dos sistemas causadores da chuva (como a velocidade de deslocamento e a orientação dos sistemas atmosféricos).

Ressalta-se que a presença de um período marcado por um evento extremos de cheias não está diretamente associado a um evento climático extremo, uma vez que os ECE's referem-se a condições meteorológicas atípicas e de ocorrência menos frequente, conforme o proposto por Pachauri *et al.*, (2014) para essa definição. Em contrapartida, o estudo de Teixeira & Prieto (2020), que analisou a periodicidade dos EEC's no Rio Grande do Sul entre 2003 e 2014, identificou 37 episódios classificados como eventos extremos de chuva persistente, caracterizados por duração mínima de cinco dias e acumulado total de precipitação igual ou superior a 60 mm. Esses dados contrastam significativamente com os eventos climáticos extremos mais recentes registrados no estado, especialmente a tragédia ocorrida entre abril e maio de 2024, em que diversos municípios registraram volumes de precipitação que superaram suas médias históricas logo nas primeiras 24 horas do evento, como foi o caso de Encantado, que acumulou 185 mm de chuva em um único dia (Faleiro, 2024).

A Figura 53 também apresenta destaque (em lilás) para os anos referentes à maior incidência de desastres causados por chuvas entre os anos de 2013 a 2023 no RS, de acordo com a nota técnica da Fiocruz (Observatório de Clima e Saúde, 2024), sendo o ano de 2023 referente ao ECE. O documento também destaca que os anos de 2015, 2016 e 2023 coincidiram com períodos de El Niño, caracterizado por influenciar no aumento expressivo da precipitação média no sul do Brasil. De maneira geral, esses eventos têm consequências diretas especialmente nas bacias dos rios Jacuí, Taquari, Caí, Sinos e Gravataí, onde inundações rápidas acarretam em desastres significativos (Observatório de Clima e Saúde, 2024)

A proposta de dispor diferentes atributos em um mesmo climograma faz parte da perspectiva de expor os principais anos com evidências bibliográficas de eventos hidrológicos de intensidade variada, que por sua vez desencadearam múltiplas consequências para o contexto socioambiental e econômico do Rio Grande do Sul e, em particular, para o Vale do Taquari.

### Climograma - Vale do Taquari (2000 - 2024)



**Figura 53:** Climograma relativo aos anos de 2000 a 2024, apresentando a variação interanual de precipitação e temperatura (em escala logarítmica) para o Vale do Taquari, com base nos dados de CHIRPS e MODIS. As faixas coloridas que se encontram abaixo dos anos representam: Evento Climático Extremo (ECE), segundo Marengo *et al.* (2024); Evento Extremo de Cheias (EEC), de acordo com Righi; Robaina (2010) e Teixeira; Prieto (2020); e os anos com alta incidência de desastres desencadeados por chuvas intensas, de acordo com a Fiocruz (Observatório de Clima e Saúde, 2024). Essa compilação de dados distintos teve como base o objetivo de demonstrar diferentes perspectivas associadas a anomalias observadas de acordo com a literatura.

Analizando de maneira mais aprofundada os anos de 2020, 2023 e 2024 é possível observar variações significativas entre os períodos mais chuvosos e mais secos, demonstrando também uma clara tendência do comportamento da temperatura, que associa os períodos mais frios entre os meses de maio a agosto, respectivos aos finais do outono e inverno. Nesse contexto, o menor valor alcançado foi de cerca de 14°, referente ao intervalo entre julho e agosto de 2024. Na Figura 54 apresentam-se os climogramas relativos aos anos de 2020, 2023 e 2024, com os marcos dos ECE's, tanto relativos ao ano em questão (em vermelho) quanto aos demais observados (em laranja), para fins de comparação.

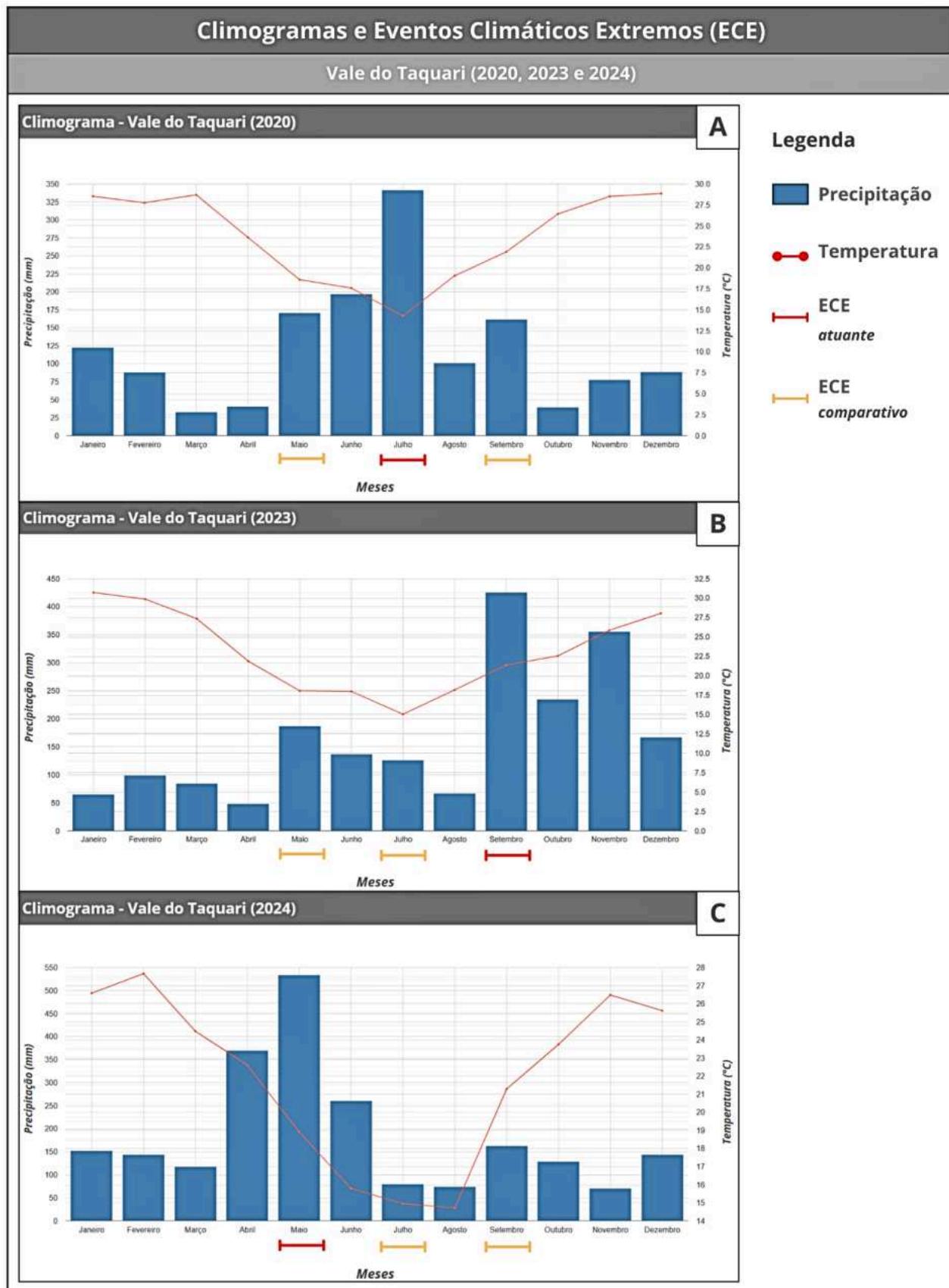
A partir desse mosaico, observa-se que os eventos extremos analisados não apresentam uma concentração expressiva num único mês ao longo dos anos. No entanto, nota-se uma predominância entre o outono e o inverno, com ocorrências em maio (outono), julho (inverno) e setembro (final do inverno e início da primavera).

Também é possível observar que os climogramas apresentam um padrão que reflete em grande parte as características da classificação de Köppen para região (majoritariamente de clima subtropical úmido, de sigla Cfa), que descreve um clima ameno, com verões quentes, invernos brandos e ausência de estação seca definida. As temperaturas médias dos meses mais quentes superam os 22 °C, enquanto nos meses mais frios podem alcançar valores abaixo de 18 °C (NOAA, 2023).

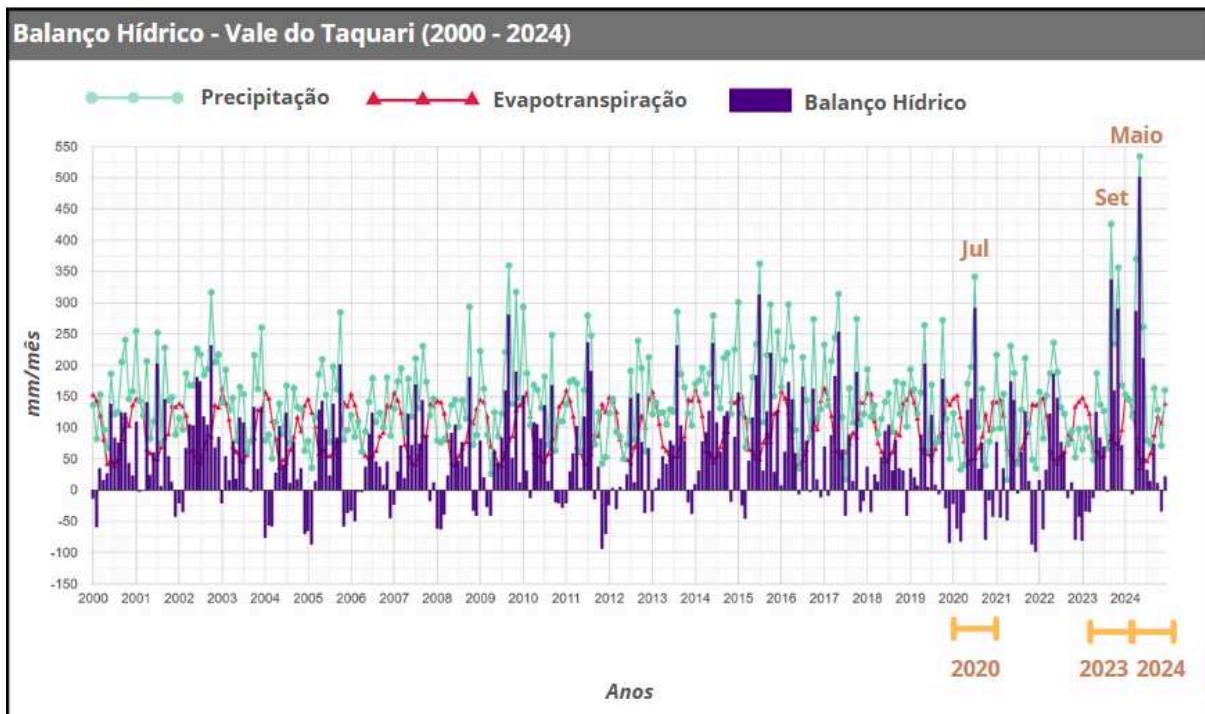
Entretanto, verifica-se que a precipitação no Vale do Taquari para esses anos de referência destoa do padrão esperado para o clima subtropical úmido, em que as chuvas são bem distribuídas ao longo do ano, embora apresente certa variabilidade. Nesse contexto, é possível observar que o vale apresentou intervalos de tempos mais chuvosos em períodos discrepantes e em faixas de tempo relativamente pequenas (intervalos de 3 meses), fator possivelmente influenciado pela ocorrência dos ECE's e também por consequências de variações atmosféricas, mas que podem chamar a atenção para a necessidade de recorrer a bibliografias de maior detalhamento de definição de zonas climáticas.

Outra abordagem de análise do panorama de tendências climáticas no Vale do Taquari está apresentada na Figura 55, referente a variação do balanço hídrico mensal entre os anos de 2000 a 2024, com base nos dados de precipitação (em verde), evapotranspiração (em vermelho) e saldo final do balanço hídrico (em roxo). Esta representação gráfica permite visualizar de forma clara os períodos de maior aporte hídrico ao longo da série histórica. Nele, destacam-se três marcos recentes de eventos hidrológicos extremos (em laranja): julho de 2020, novembro de 2023 e maio de 2024. Esses meses estão entre os maiores picos de saldo positivo de balanço hídrico na série temporal, indicando valores extremos de volume pluviométrico em relação à evapotranspiração, o que reflete a gravidade da ocorrência desses ECE's.

A Figura 55 constitui o último produto dessa seção, e contribui para reforçar a importância da avaliação integrada das variáveis climáticas por meio da análise em séries temporais, assim como o papel fundamental da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto para compreender as tendências climáticas recentes no Vale do Taquari.



**Figura 54:** Climogramas referentes aos anos de 2020 (A), 2023 (B) e 2024 (C) para o Vale do Taquari, com destaque para os ECE's.



**Figura 55:** Balanço hídrico mensal no Vale do Taquari (2000–2024). O gráfico apresenta a evolução das variáveis de precipitação, evapotranspiração e saldo do balanço hídrico ao longo da série temporal. Destacam-se os meses de julho de 2020, setembro de 2023 e maio de 2024, sendo estes os marcos dos ECE's recentes.

## 8. DISCUSSÕES

Este capítulo dedica-se à discussão dos principais resultados obtidos neste estudo, que teve como foco a análise da ocorrência dos movimentos de massa durante o ECE 2024, com recorte geográfico específico para a porção mais ao norte do Vale do Taquari (RS). O objetivo geral é compreender o papel dos atributos geomorfológicos e geológicos na deflagração desses processos, bem como identificar os principais padrões associados neles, por meio da integração dos produtos gerados com o referencial teórico previamente estabelecido na literatura. Assim, as investigações centram-se na forma com que esses atributos contribuíram para a distribuição e intensidade dos movimentos de massa, vislumbrando a possibilidade de compreender futuras ocorrências na área e mitigar impactos socioambientais desencadeados pelos ECE's.

A discussão também evidencia o papel estratégico das geociências na análise espacial desses fenômenos, sobretudo diante da constatação de que o aumento de casos de eventos extremos é uma tendência global (Pachauri *et al.*, 2014), com o Rio Grande do Sul registrando cenários de inundações progressivamente mais

críticos (ANA, 2025), como constatado pelo acompanhamento dos padrões climáticos recentes no Vale do Taquari neste estudo. Para tanto, finaliza-se o capítulo demonstrando que a tragédia de 2024 não representa um episódio isolado, mas sim um marco dentro de uma sequência histórica recorrente de eventos hidrológicos de diversas magnitudes, que refletem a vulnerabilidade da região à ocorrência de desastres.

De maneira geral, processos de movimentos de massa estão relacionados à interação entre múltiplas condicionantes, que envolvem tanto atributos físicos do substrato quanto o grau de exposição da superfície aos agentes desencadeadores. Nesse sentido, este estudo optou por iniciar a análise a partir dos fatores geomorfométricos, com o objetivo de estabelecer correlações entre a compartimentação do relevo e a distribuição dos movimentos de massa. Além disso, foram consideradas variáveis complementares, como declividade e risco potencial, associados à susceptibilidade a alagamentos, encharcamentos e escorregamentos.

Com base nessa abordagem, a análise dos geomorphons (Jasiewicz & Stepinski, 2013) revelou que a porção estudada do Vale do Taquari é predominantemente composta por encostas, cristas e vales, distribuídos em diferentes níveis altimétricos. As maiores altitudes concentram-se nas porções correspondentes à Serra Geral e ao Planalto dos Campos Gerais, onde os valores podem ultrapassar os 700 metros. Por outro lado, as áreas planas mostram-se geograficamente restritas, localizadas principalmente na porção sul da área de estudo e ao longo da planície de inundação do Rio Taquari.

No que diz respeito à faixa ocupada pela planície de inundação do Rio Taquari, é possível observar que existem consideráveis variações de largura ao longo do canal principal, com a porção à montante apresentando as menores dimensões. Nessa região, onde encontra-se também a Área III deste estudo, observa-se a predominância de encostas e cristas, com drenagens encaixadas em vales e terrenos escavados, assim como planícies restritas à várzeas. Em especial, essa área foi intensamente afetada por movimentos de massa ao longo do ECE 2024, dos quais grande parte se projetavam a vales profundos e relativamente estreitos, enquanto uma parcela menor de pontos de ruptura desencadearam processos que se projetaram para a planície de inundação.

Além disso, é importante destacar que essa região abriga municípios como Encantado, Muçum e Roca Sales, os quais estão entre os mais severamente

impactados pelo ECE 2024 (Detoni *et al.*, 2024). Nesses locais, a ocupação urbana está fortemente associada às proximidades do rio, em faixas estreitas e que apresentam reduzida capacidade de infiltração, fazendo com que haja alta vulnerabilidade da população local frente às inundações rápidas do rio, como em casos de EEC's e ECE's.

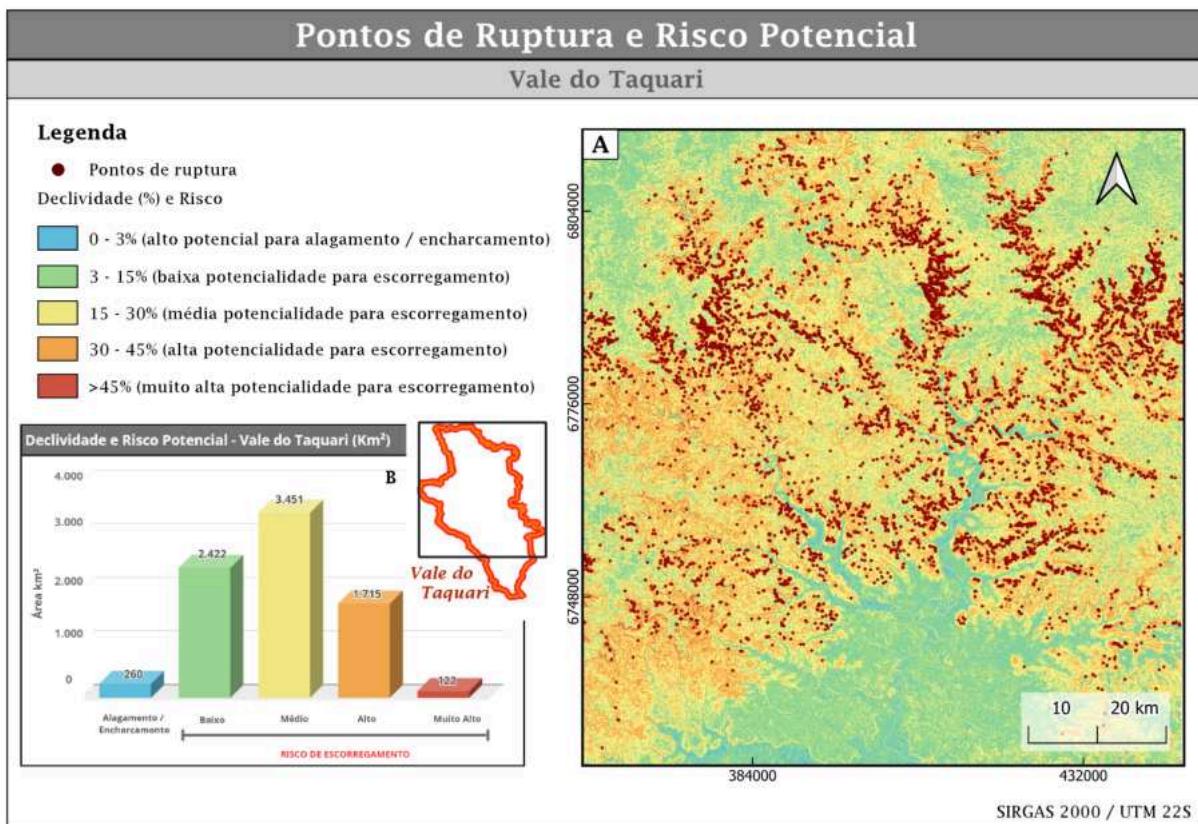
Em contraste da porção a montante, a área mais a jusante do rio Taquari apresenta uma configuração geomorfológica distinta, marcada pela presença de planícies de inundaçāo mais largas e contínuas, tanto do canal principal quanto aos rios subordinados, que acompanham as áreas relativamente planas pertencentes à unidade dos Patamares da Serra Geral. De forma mais específica, o início da transição dessas características geomorfológicas começa a ser observada a partir da Área IV, a qual se destacou por apresentar a maior proporção relativa de superfícies planas entre as três sub-regiões analisadas, apesar de também incluir setores pertencentes à Serra Geral e ao Planalto dos Campos Gerais. Essa maior porcentagem de terrenos planos exerce influência direta tanto na dinâmica hidrológica local quanto no comportamento dos processos gravitacionais, sendo observado nessa região a propagação mais ampla dos movimentos de massa oriundos de áreas instáveis adjacentes.

No que se refere às demais áreas estudadas do Vale do Taquari, especialmente aquelas localizadas nas porções de maior altitude, observa-se a predominância de feições típicas de ambientes serranos e de planalto, como encostas, cristas e vales bem definidos. Essas formas se destacam em meio às demais no histograma de distribuição de classes, quando relacionado a outras feições, tais como bases de encosta, ressaltos e superfícies planas. Estas últimas, por sua vez, são bastante restritas, ocorrendo apenas de forma pontual e associadas a elementos específicos da paisagem, como pequenos açudes ou áreas represadas artificialmente.

Nesse contexto, a sub-região II representa de forma expressiva essa configuração morfológica, concentrando aproximadamente 500 m<sup>2</sup> de áreas planas em meio a um relevo dominado por encostas íngremes e vales encaixados. Os movimentos de massa identificados nessa área apresentam distribuição localizada, marcada por numerosos pontos de ruptura e pela recorrência de eventos coalescentes. Como resultado, os movimentos gravitacionais seguem o direcionamento natural das vertentes e encerram-se nas drenagens em vales

profundos, aumentando o aporte sedimentar dos rios e influenciando na dinâmica de transporte das partículas.

Além da abordagem geomorfológica clássica, baseada na subdivisão de feições do relevo, é possível complementar a análise da paisagem e da distribuição dos movimentos de massa por meio do estudo da declividade do terreno, variável fundamental para o entendimento do grau de estabilidade das encostas. Nesse contexto, a classificação adotada permitiu distinguir áreas com maior propensão a alagamentos e encharcamentos daquelas com potencial para a ocorrência de escorregamentos (Figura 56), variando de risco baixo a muito alto, segundo a classificação de Hoff (2025).



**Figura 56:** Relação entre pontos de ruptura e declividade. A imagem destaca os pontos de ruptura em meio ao mapa de declividade e risco potencial, evidenciando a ocorrência de movimentos de massa desencadeados a partir da 15 %, isto é, risco médio.

Com base nessa distinção, observou-se que, de modo geral, os pontos de ruptura associados aos movimentos de massa concentraram-se predominantemente em áreas classificadas com risco médio a alto para escorregamentos, mesmo quando consideradas diferentes unidades geomorfológicas. Esse padrão tornou-se ainda mais evidente por meio da análise comparativa entre as três sub-regiões, que

apresentaram comportamentos semelhantes: áreas relativamente limitadas com risco para alagamentos e encharcamentos, contrastando com extensas zonas classificadas com risco médio a alto para escorregamentos.

Essa regularidade reforça a importância da declividade como um dos principais fatores de controle espacial na deflagração de movimentos de massa. Além disso, evidencia que a análise integrada entre compartimentação do relevo e categorias de risco geomorfológico contribui significativamente para a compreensão da distribuição e da dinâmica dos processos de instabilidade no território analisado.

Outra perspectiva relevante para a análise dos movimentos de massa envolve a consideração das variáveis geológicas, especialmente os padrões estruturais da região. Neste estudo, buscou-se compreender a relação entre a distribuição dos lineamentos estruturais e os pontos de ruptura, observando-se uma correlação visual mais evidente em áreas associadas à Formação Serra Geral, particularmente nas altitudes mais elevadas. Nesses setores, nota-se uma maior densidade de lineamentos por unidade de área, o que coincide com a concentração de pontos de ruptura, sugerindo uma influência direta dos elementos estruturais na deflagração dos processos.

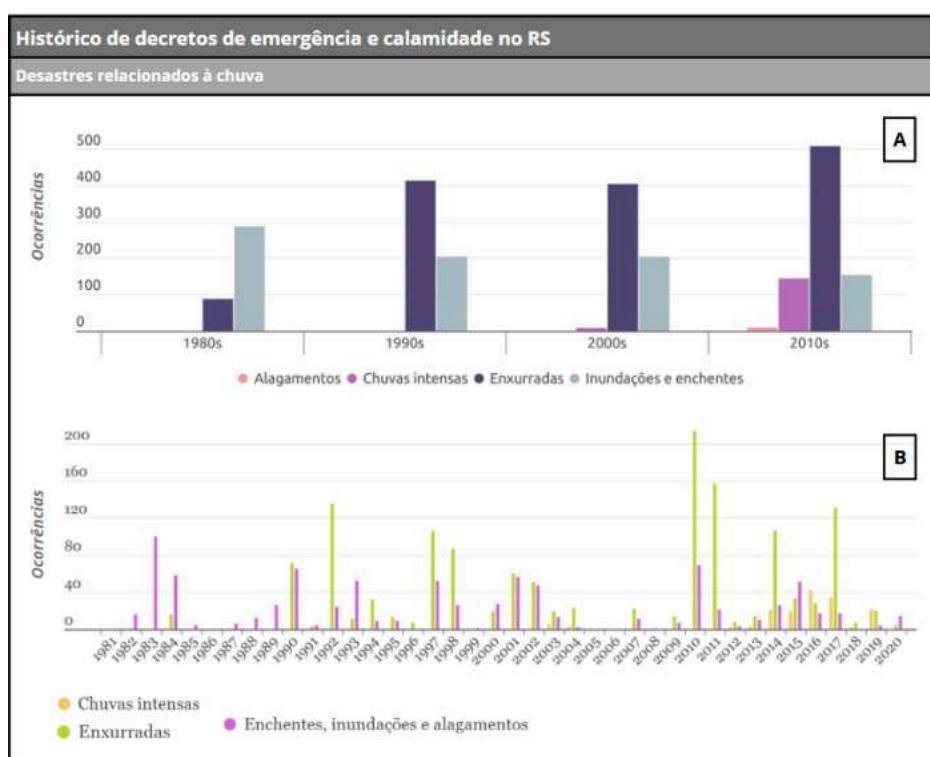
Em particular, a sub-região II representa bem esse cenário, evidenciando o papel do controle estrutural tanto na organização morfológica do relevo quanto na geração de zonas de fraqueza potencialmente associadas ao fraturamento da Formação Serra Geral (Fácies Gramado). Nessa área, destaca-se a presença de um canal sinuoso central, cujo traçado é condicionado pelo arranjo fraturas que o margeiam. Nesse cenário ocorreram os principais movimentos de massa, originados nas vertentes que ladeiam o canal e que evoluíram até os vales encaixados, reforçando a interação entre estrutura geológica, morfologia e dinâmica gravitacional.

A análise integrada dos resultados obtidos até então permite afirmar que as variáveis geomorfológicas e geológicas possuem influência sobre a ocorrência e a distribuição dos movimentos de massa na área de estudo durante o ECE 2024. No entanto é importante reconhecer que o grau de exposição das áreas ao agente desencadeador foi expressivo, isto é, às chuvas intensas de maio de 2024..

No caso do Vale do Taquari, assim como em grande parte do território brasileiro, os movimentos de massa são fortemente condicionados por fatores hidrológicos, principalmente pela ocorrência de chuvas intensas e prolongadas

(Kobiyama, *et al.*, 2024). Esses eventos aumentam a poro-pressão nos solos, reduzem sua coesão e favorecem a instabilidade dos terrenos. Por esse motivo, compreender a dinâmica climática da região torna-se fundamental para o estudo ampliado dos movimentos de massa. Ao se considerar a série histórica das últimas duas décadas, observa-se que o Vale do Taquari foi atingido por cinco Eventos Extremos de Cheias (EEC's), quatro Eventos Climáticos Extremos (ECE's) e três anos com maior incidência de desastres diretamente relacionados a chuvas intensas, além de outros eventos não classificados formalmente nessas categorias. Esse histórico evidencia que os eventos hidrológicos intensos são recorrentes na região e constituem os principais fatores desencadeadores de movimentos de massa. Portanto, sua consideração é indispensável na análise integrada de riscos e na elaboração de estratégias voltadas à prevenção e gestão de desastres.

A imagem abaixo, Figura 57, apresenta o panorama de decretos de emergência e calamidade emitidos pelo estado do RS para desastres relacionados à chuva, entre 1980 e 2020, sendo possível observar essa tendência.



**Figura 57:** Representação gráfica do histórico de decretos de emergência e calamidade no estado do RS, entre 1980 a 2020, com acompanhamento por década (A) e anual (B). Observa-se um aumento crescente de ocorrências em (A), apesar da variação anual entre as classes não ser linear. Nesse contexto, destaca-se eventos de enxurradas e inundações. Fonte: modificado de Davila (2021).

## 9. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo central compreender os fatores que condicionaram a ocorrência de movimentos de massa no Vale do Taquari durante o Evento Climático Extremo (ECE) de 2024, a partir de três frentes complementares: a caracterização geomorfométrica da área de estudo, a integração e cruzamento de dados temáticos qualitativos e quantitativos, e a análise das tendências climáticas recentes com base em séries temporais. Dessa forma, por meio da articulação dessas abordagens, foi possível identificar padrões relevantes de vulnerabilidade física do território e estabelecer relações diretas entre a configuração do relevo, os elementos geológicos estruturais e a ocorrência de processos de instabilidade.

Os resultados obtidos demonstraram que a área de estudo apresenta características físicas propícias à ocorrência de movimentos de massa em diferentes escalas. Entre os fatores determinantes, destacam-se o padrão de declividade na região (predominantemente a partir de 15%, o que favorece a ocorrência de escorregamentos) a compartimentação geomorfológica (representada em sua maioria por encostas, cristas e vales) e os padrões estruturais de falhas e fraturas (deformações rúpteis que geram zonas de fragilidade geológica). Esses elementos, quando analisados em conjunto, foram capazes de explicar de forma generalizada a distribuição espacial e a densidade de movimentos identificados durante o ECE 2024.

Observou-se, ainda, uma correlação clara entre a organização da rede de drenagem com a presença dessas estruturas geológicas, o que se revelou decisivo para a compreensão do arcabouço estrutural da região, associado predominantemente a lineamentos de direção NE-SW e NW-SE, com feições subordinadas de menor quantidade em tendência E-W. Essa relação reforça a importância do controle estrutural nos processos de modelagem do relevo e da rede hidrográfica.

Além disso, dentro da perspectiva de deflagração dos movimentos de massa, este estudo também pode ressaltar características de seus eventos motivadores, isto é, relacionado ao grau de exposição. Esse grau de exposição mostrou-se fortemente relacionado à frequência e à intensidade dos eventos hidrológicos intensos, os quais se tornam cada vez mais recorrentes na região. A análise das séries temporais de precipitação e eventos críticos revelou que tais ocorrências fazem parte da realidade

climática do Vale do Taquari, exigindo atenção contínua e planejamento preventivo. Dessa forma, reforça-se a importância de incorporar análises baseadas em dados históricos, de modo a compreender tendências e projetar cenários futuros que possam orientar estratégias de mitigação e adaptação no contexto das mudanças climáticas.

Como perspectiva para trabalhos futuros, destaca-se a importância do aperfeiçoamento das técnicas de caracterização estrutural, em especial no que se refere à densidade linear de fraturas. Para isso, recomenda-se o aperfeiçoamento da utilização do módulo LINE do *software* PCI Geomatics, combinando o MDE a outros produtos e etapas de processamento, levando em consideração também o aprimoramento no processo de fotointerpretação. Além disso, sugere-se a aplicação de métodos estatísticos espaciais adicionais para avaliar a densidade de lineamentos com maior precisão, o que poderá contribuir significativamente para o refinamento do produto de densidade linear de fraturas e, consequentemente, para as análises de risco associado aos condicionantes geológico-estruturais. A ampliação da base de dados temáticos, aliada ao avanço das metodologias de processamento e análise geoespacial, permitirá a continuidade e o aprofundamento deste estudo, contribuindo para a construção de diagnósticos cada vez mais robustos e aplicáveis à gestão de riscos de movimentos de massa no Vale do Taquari.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de *et al.* **Províncias Estruturais Brasileiras**. Campina Grande (Paraíba): [s. n.], 1977. Disponível em: <https://tinyurl.com/2uy9kjxz>. Acesso em: 10 jun. 2025.

ALVALÁ, Célia dos Santos Regina *et al.* Analysis of the hydrological disaster occurred in the state of Rio Grande do Sul, Brazil in September 2023: Vulnerabilities and risk management capabilities. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 110, p. 104645, 2024. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2024.104645.

ANA. **As enchentes no Rio Grande do Sul: lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente**. Brasília (DF): Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2025. Disponível em: <http://igeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/25529>. 20 mar. 2025.

ANA. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 5k (BHO 2017 5k)**. [s. l.], 2017. Disponível em: <https://l1nk.dev/2Scja>. Acesso em: 19 jun. 2025.

ANA, Agência Nacional de Águas. Precipitação. Catálogo de Metadados ANA, , 2016. Disponível em: <https://l1nk.dev/Xt5Us> . Acesso em: 11 jun. 2025. Climatologia, Atmosfera.

BECK, Hylke E. *et al.* High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901-2099 based on constrained CMIP6 projections. **Scientific Data**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 724, 2023. DOI:10.1038/s41597-023-02549-6.

BELOW, Regina; WIRTZ, Angelika; GUHA-SAPIR, Debarati. Disaster Category Classification and peril Terminology for Operational Purposes. [s. l.], p. 20, 2009. Disponível em: [https://www.cred.be/sites/default/files/DisCatClass\\_264.pdf](https://www.cred.be/sites/default/files/DisCatClass_264.pdf). Acesso em: 19 jun. 2025.

BOMBASSARO, Magno; ROBAINA, Luis Eduardo de Souza. Contribuição Geográfica para o Estudo das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. **Revista Geografias**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 69–86, 2010. DOI:10.35699/2237-549X..13297.

BOTH, Cristina Grasiela *et al.* **Uso da modelagem matemática para a previsão de enchentes no Vale do Taquari-RS**. Serra Negra (São Paulo): [s. n.], 2008. Disponível em: <https://l1nq.com/bvdQw> . Acesso em: 12 fev. 2025

BRUSKI, Sabrina Deconti; TOGNOLI, Francisco Manoel Wohnrath; ARAUJO, Thiago Peixoto de. Geotecnologias no contexto das cidades mais resilientes: zoneamento de áreas de risco a inundações como ferramenta de planejamento urbano. [s. l.], v. 1, p. 30–57, 2020. DOI:10.59550/engurbdebate.v1i1.92.

BUFFON, Franco Turco *et al.* **Relatório de atividades departamento de hidrologia: sistema de alerta hidrológico da Bacia do rio Taquari: relatório técnico de operação no período de novembro de 2020 a novembro 2021.** [S. I.]: CPRM, 2021. Technical Report. Disponível em: <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/22570>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CATALYST. PCI Geomatics launches CATALYST - Earth Data, Simplified. *In:* 2025. Disponível em: <https://catalyst.earth/about/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

CEMADEN. **Mapeamento Dos Movimentos De Massa Relacionados Ao Desastre De Abril-Maio De 2024 No Estado Do Rio Grande Do Sul.** 2024. Nota Técnica. Disponível em: <https://shre.ink/xbsj>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CENTRO DE ESTUDOS DA METRÓPOLE. **Zonas Climáticas do Brasil, conforme Köppen.** [S. I.], 2021. Disponível em: <http://web.fflch.usp.br/centrodametropole/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

CESAR, Antônio Romalino Santos Fragoso. **O cráton do Rio de la Plata e o cinturão Dom Feliciano no escudo Uruguaio-Sul-Riograndense.** Balneario de Camboriu: [s. n.], 1980. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002166822>. Acesso em: 10 abr. 2025.

DAVILA, Bibiana. Mudança climática intensifica eventos extremos no Rio Grande do Sul. *In:* HUMANISTA. 28 out. 2021. Disponível em: <https://shre.ink/xbsA>. Acesso em: 7 jul. 2025.

DEFESA CÍVIL, Casa Militar. **Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS - 17/5, 18h.** [S. I.], 2024. Disponível em: <https://shre.ink/xbsS>. Acesso em: 10 abr. 2025.

DETONI, Luana Pavan *et al.* Eventos climáticos extremos e seus impactos socioespaciais em cidades pequenas do Rio Grande do Sul - Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, [s. I.], v. 21, n. 1, 2024. DOI:10.54399/rbgdr.v21i1.8020.

ECKHARDT, Rafael Rodrigo *et al.* **Impactos Econômicos Das Inundações No Vale Do Taquari.** Bento Gonçalves (Rio Grande do Sul): [s. n.], 2013. Disponível em: <https://shre.ink/xbsD>. Acesso em: 10 abr. 2025.

ECKHARDT, Rafael Rodrigo. **Zoneamento ambiental do Vale do Taquari-RS.** 2005. TCC - UNIVATES, [s. I.], 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10737/815>. Acesso em: 10 abr. 2025.

EGAS, Harideva Marturano *et al.* Landslides Rio Grande Do Sul April- May 2024. Zenodo, , 2024. Disponível em: <https://zenodo.org/records/13225473>. Acesso em: 7 maio 2025.

EMBRAPA. **Clima.** [S. I.], 2025. Disponível em: <https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>. Acesso em: 8 jul. 2025.

EMBRAPA. Mapa de suscetibilidade à erosão dos solos no Brasil. , 2022. Disponível em: <https://shre.ink/xbsp> . Acesso em: 8 jul. 2025.

FA. (RE)CRIA RS. *In:* FACULDADE DE ARQUITETURA UFRGS. 2024. Disponível em: <https://shre.ink/xbsd> . Acesso em: 2 jul. 2025.

FALEIRO, Felipe. Rio Taquari sobe mais de um metro por hora em Roca Sales. *In:* RÁDIO A HORA. 30 abr. 2024. Disponível em: <https://grupoahora.net.br/ao-vivo/?programa>. Acesso em: 8 jul. 2025.

FEE. **Corede Vale do Taquari.** [s. l.], 2023. Disponível em: <https://arquivofee.rs.gov.br/perfil-socioeconomico/coredes/detalhe/>. Acesso em: 8 jul. 2025.

FERRER, João; DANÉRIS, Marcelo; MARQUES, Pedro Romero. **RS: Resiliência e Sustentabilidade.** Porto Alegre (Rio Grande do Sul): Libretos, 2025. Disponível em: <https://www.libretos.com.br/noticias/rs-resiliencia-e-sustentabilidade.html>. Acesso em: 7 maio 2025.

FERRER, J.; DANÉRIS, M.; MARQUES, P. R. RS: Resiliência e Sustentabilidade. Porto Alegre (Rio Grande do Sul): Libretos, 2025. 300 p. Disponível em: <https://www.libretos.com.br/noticias/rs-resiliencia-e-sustentabilidade.html> .

FIERGS, Unidade de Estudos Econômicos. **Principais indicadores econômicos dos municípios atingidos pelas enchentes no Rio Grande do Sul: Estado de Calamidade x Situação de Emergência (06/06/2024).** [s. l.]: FIERGS, 2024. Disponível em: <https://shre.ink/xbsc> . 7 maio 2025.

FORBES, Katharine A. *et al.* Simulating the hydrological response to predicted climate change on a watershed in southern Alberta, Canada. **Climatic Change**, [s. l.], v. 105, n. 3, p. 555–576, 2011. DOI:10.1007/s10584-010-9890-x.

FREITAS, Elisete Maria de *et al.* **Marcas na paisagem: memórias para construir a resiliência no Vale do Taquari (RS).** Lajeado, RS: Univates, 2025. Acesso em: 8 jul. 2025.

FRITZSONS, Elenice; WREGE, Marcos Silveira; MANTOVANI, Luiz Eduardo. Altitude E Temperatura: Estudo Do Gradiente Térmico No Rio Grande Do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 16, 2015. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/39665>. Acesso em: 8 jul. 2025.

FUNK, Chris *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes | Scientific Data. [s. l.], p. 21, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/sdata201566>. Acesso em: 18 jun. 2025.

GIACOMELLI, Lucas Verino Zanella *et al.* Cheias históricas ocorridas no Rio Grande do Sul em julho de 2020. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/219460>. Acesso em: 18 jun. 2025.

GRASS GIS. **GRASS GIS 8.4.2dev Reference Manual - GRASS GIS Manual.** [s. l.], 2023. Manual. Disponível em: <https://grass.osgeo.org/grass-stable/manuals/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

HOFF, Rosemary. Avaliação do relevo e identificação de áreas de risco geológico e impactadas pela catástrofe climática em 2024. In: Diagnóstico E Proposições Para Mitigar Riscos De Chuvas Extremas Na Serra Gaúcha. - PORTAL EMBRAPA. 1ª edição. Brasília, DF: 2025. Disponível em:<https://encurtador.com.br/Ou3Db>. Acesso em: 18 jun. 2025.

IBGE. Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil. , 2021. Disponível em: <https://shre.ink/xbsm>. Acesso em: 19 jun. 2025.

IBGE. Base Dados Espacial 1:250.000, Brasil. , 2023a. Disponível em:<https://shre.ink/xbBY> . Acesso em: 11 jun. 2025.

IBGE. Bases cartográficas contínuas. , 2025. Disponível em:<https://shre.ink/xbBE> . Acesso em: 19 jun. 2025.

IBGE. Pedologia. , 2023b. Disponível em:<https://shre.ink/xbBy> . Acesso em: 19 jun. 2025.

IHU, Instituto Humanitas Unisinos. Brasil teve 12 eventos climáticos extremos em 2023. [s. l.], 9 maio 2024. Disponível em:<https://shre.ink/xbBC> . Acesso em: 19 jun. 2025.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Eventos extremos: setembro/2023 foi marcado por chuva acima da média no Rio Grande do Sul e calor extremo.** [s. l.], 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/eventos-extremos-2>. Acesso em: 18 jun. 2025.

INMET. **Nota de Eventos Extremos em Junho de 2025.** [s. l.], 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/nota-de-extremos-em-junho-de-2025>. Acesso em: 10 jul. 2025. Acesso em: 18 jun. 2025.

JASIEWICZ, Jarosław; STEPINSKI, Tomasz F. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, [s. l.], v. 182, p. 147–156, 2013. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.11.005.

KOBIYAMA, Masato *et al.* **Identificação e Mapeamento de Movimentos de Massa.** [s. l.]: Instituto de Pesquisas Hidráulicas (UFRGS), 2024. Disponível em: [https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/?page\\_id=200](https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/?page_id=200). Acesso em: 18 jun. 2025.

KREUTZ, Marcos Rogério; MACHADO, Neli Galarce; HOPPE, Willian Henrique. História ambiental do Rio Taquari, Rio Grande do Sul. **Paisagem e Ambiente**, [s. l.], v. 34, n. 51, 2023. DOI: 10.11606/issn.2359-5361.paam.2023.201746.

LAN, J. et al. The Shift of Soil Bacterial Community After Afforestation Influence Soil Organic Carbon and Aggregate Stability in Karst Region. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 13, p. 901126, 27 jun. 2022. DOI: 10.3389/fmicb.2022.901126. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9271926/>. Acesso em: 23 jul. 2025.

LAUX, Jorge Henrique. **Escudo Sul-Rio-Grandense, estado do Rio Grande do Sul**: Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Porto Alegre: CPRM, 2021. Technical Report. Disponível em: <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/20521>. Acesso em: 18 jun. 2025.

LAUX, Jorge Henrique et al. **Repositório Institucional de Geociências: Proposta de evolução do Escudo Sul-Rio-Grandense**. Florianópolis: [s. n.], 2023. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/24558?mode=full>. Acesso em: 18 jun. 2025.

LEE, Hoesung et al. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva (Switzerland): Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

MAPBIOMAS. Desmatamento caiu em todos os biomas brasileiros em 2024. In: 15 maio 2025. Disponível em: <https://shre.ink/xbBL>. Acesso em: 13 jun. 2025.

MAPBIOMAS. Cidades brasileiras crescem mais em encostas e áreas de risco. In: 8 nov. 2024a. Disponível em: <https://shre.ink/xbB5>. Acesso em: 18 jun. 2025.

MAPBIOMAS. MapBiomass. In: 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/downloads/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

MAPBIOMAS. Módulo Urbano. In: 2024b. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/modulo-urbano/>. Acesso em: 18 fev. 2025.

MARENGO, José A. et al. O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. **Estudos Avançados**, [s. l.], v. 38, n. 112, p. 203–228, 2024. DOI: 10.1590/s0103-4014.202438112.012.

MEYER, Adolph Frederick. **The elements of hydrology**. FIRST EDITIONed. New York: JOHN WILEY & SONS, Inc., 1917. Disponível em: <https://www.loc.gov/item/17021702/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

MILANI, Edison José *et al.* Bacia do Paraná. *In: BOLETIM DE GEOCIÊNCIAS DA PETROBRAS.* [S. I.: s. n.], 2007. v. 115, p. 265–287. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/265291564\\_Bacia\\_do\\_Parana](https://www.researchgate.net/publication/265291564_Bacia_do_Parana). Acesso em: 18 jun. 2025.

MILANI, Edison José. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. *In: GEOLOGIA DO CONTINENTE SUL-AMERICANO: EVOLUÇÃO DA OBRA DE FERNANDO FLÁVIO MARQUES DE ALMEIDA.* São Paulo: Beca, 2004. p. 265 279. Disponível em: <https://shre.ink/xbBS> . Acesso em: 18 jun. 2025.

MILANI, Edison Jose; RAMOS, Victor Alberto. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. [s. I.], v. 28, p. 473–484, 1988. Disponível em: <http://bjg.siteoficial.ws/1998/n.4/8.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2025.

MMA, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Brasil lança iniciativa para estruturar 100 ações climáticas de alto impacto nos municípios.** [S. I.], 2025. go.br. Disponível em: <https://shre.ink/xbBg> . Acesso em: 19 jun. 2025.

MMA, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Cidades Verdes Resilientes — Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima.** [S. I.], 2024. Disponível em: <https://shre.ink/xbBr> . Acesso em: 18 jun. 2025.

MORAES, Sofia Royer *et al.* Retromodelagem do evento extremo de inundação do Rio Taquari no HEC-RAS, ocorrido em 09 de julho de 2020, no município de Lajeado / RS. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, [s. I.], n. 42, p. 104–132, 2023. Disponível em: <https://revistas.planejamento.rs.gov.br/index.php/boletim-geografico-rs/article/view/4530>.

MORELATTO, Rodrigo. **Bacia do Paraná: Sumário Geológico e Setores em Oferta.** [S. I.]: Superintendência de Definição de Blocos - SDB, 2017. Disponível em: <https://shre.ink/xbBW> . Acesso em: 18 jun. 2025.

NASA. MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 | NASA Earthdata. Earth Science Data Systems, NASA, , 2021. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod16a2gf-061>. Acesso em: 9 jul. 2025.

NOAA. **JetStream Max: Adição de Subdivisões Climáticas Köppen-Geiger | Administração Oceânica e Atmosférica Nacional.** [S. I.], 2023. Disponível em: <https://shre.ink/xbBT> . Acesso em: 8 jul. 2025.

**OBSERVATÓRIO DE CLIMA E SAÚDE. As inundações no Rio Grande do Sul, impactos imediatos e suas possíveis consequências sobre a saúde da população.** [S. I.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://shre.ink/xbBQ> . Acesso em: 8 jul. 2025.

OLIVEIRA, Guilherme Garcia de *et al.* **Interpretação e mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Taquari- Antas, com suporte de técnicas de geoprocessamento e utilização de dados orbitais e cartográficos.** João Pessoa (Paraíba): [s. n.], 2015. Disponível em: <https://shre.ink/xbpG>. Acesso em: 18 jun. 2025.

PACHAURI, R. K. *et al.* **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. Disponível em: <https://epic.awi.de/id/eprint/37530/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

PAZZAGLIA, Guilherme *et al.* Caracterização Preliminar Dos Minerais Metálicos Da Sequência Matarazzo, Terreno Punta Del Este, RS. *In:* XXXII CIC - CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2023, Pelotas (Rio Grande do Sul). **9ª Semana Integrada UFPel.** Pelotas (Rio Grande do Sul): [s. n.], 2023. p. 5. Disponível em: <https://shre.ink/xbB9>. Acesso em: 18 jun. 2025.

PEATE, David W; HAWKESWORTH, Chris. J.; MANTOVANI, Marta Silvia Maria. Chemical stratigraphy of the Parana lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. **Bulletin of Volcanology**, [s. l.], v. 55, n. 1–2, p. 119–139, 1992. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000839070>. Acesso em: 18 jun. 2025.

PEREIRA, Marcos Gervasio *et al.* FORMAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS. *In:* LEONARDO TULLIO. **Formação, Classificação e Cartografia dos Solos.** 1. ed. [S. l.]: Atena Editora, 2019. p. 1–20. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300005>

PINHEIRO, Adilson; GRACIANO, Regina Luiza Gouvêa; SEVERO, Dirceu Luís. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 28, p. 281–290, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/hxgYttwTb6yWLp5ZXjft4Yz/?lang=pt>. Acesso em: 11 jun. 2025.

PORCHER, Carlos Alfredo; LOPES, Ricardo da Cunha. **Cachoeira do Sul: folha SH.22-Y-A:** Programa de Levantamentos Geológicos do Brasil. Brasília: CPRM, 2000. Relatório Técnico. Disponível em: <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/8476>. Acesso em: 18 jun. 2025.

PORTOCARRERO, H. *et al.* Aspectos hidrológicos e mecânicos da vegetação na estabilidade de taludes e encostas naturais. [s. l.], 2006. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/963337>. Acesso em: 18 jun. 2025.

RIGHI, Eléia; ROBAINA, Luis Eduardo de Souza. Enchentes do Rio Uruguai no Rio Grande do Sul entre 1980 e 2005: uma análise geográfica. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 22, p. 35–54, 2010. DOI:<https://doi.org/10.1590/S1982-45132010000100004>.

RITTER, Lawrin. **Reflexões frente ao desastre climático-ambiental das cheias do rio Taquari-Antas.** [S. I.], 2023. Disponível em: <https://ihu.unisinos.br/632424>. Acesso em: 11 jul. 2025.

SANTOS, Rozely Ferreira dos. **Vulnerabilidade Ambiental: Desastres Naturais Ou Fenômenos Induzidos?** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. Disponível em: <https://shre.ink/xBU>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SCHNEIDER, Fernanda *et al.* Investigações Arqueológicas No Vale Do Taquari, Rio Grande Do Sul, Brasil. **CLIO – Arqueológica**, [s. I.], v. 32, n. 2, p. 139–186, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/clioarqueologica/article/view/246409>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SECOM. **Boletim com informações sobre os impactos da chuva no Estado - 23/6, 9h.** [S. I.], 2025. Disponível em: <https://shre.ink/xbp4>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SECRETARIA DA RECONSTRUÇÃO GAÚCHA. **O Plano Rio Grande.** [S. I.], 2025. Disponível em: <https://planoriogrande.rs.gov.br/plano-rio-grande>. Acesso em: 19 jun. 2025.

SEDEC, A Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. **Atlas Digital de Desastres no Brasil.** [S. I.], 2025. Disponível em: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SETIC-UFSC. Estudo internacional projeta fenômenos extremos com maior frequência e intensidade no RS. *In:* NOTÍCIAS DA UFSC. 11 jun. 2024. Disponível em: <https://shre.ink/xbpR>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SOUZA, Mateus. Do primeiro alerta à catástrofe: como se desenhou a maior enchente da história. *In:* GRUPO A HORA. 1 jun. 2024a. Disponível em: <https://shre.ink/xbpF>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SGB. Manuais Técnicos - Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações. [S. I.], 2014. Portal: Prevenção de Desastres. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/manuais-tecnicos-cartas-de-suscetibilidade>. Acesso em: 24 jul. 2025.

SPGG. **Perfis Socioeconômicos.** [S. I.], 2015. Perfil Socioeconômico 2015 Vale do Taquari. Disponível em: <https://planejamento.rs.gov.br/perfis-regionais>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SPGS. **Atlas Socioeconômico do RS.** 6. ed. [S. I.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://planejamento.rs.gov.br/atlasdors>. Acesso em: 10 jul. 2025.

STEVAUX, Rafael de Souza; DILLENBURG, Sérgio Relbello. Propriedades sedimentológicas e mineralógicas das barreiras costeiras do rio grande do sul: uma análise preliminar. *In:* XIII CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO ABEQUA, 2011. **ResearchGate.** [S. I.: s. n.], 2011. Disponível em: <https://shre.ink/xbpC>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SUAREZ, Ginés; BELLO, Omar; CAMPBELL, Jack. **Avaliação dos efeitos e impactos das inundações no Rio Grande do Sul.** [S. I.]: BID, 2024. Disponível em: <https://encurtador.com.br/Zp5fH>. Acesso em: 10 jul. 2025.

TAVARES, Antonio Carlos; SILVA, Ane Caroline Freschi. Urbanização, Chuvas de Verão e Inundações: Uma Análise Episódica. **CLIMEP - Climatologia e Estudos da Paisagem**, [s. I.], v. 3, n. 1, 2008. Disponível em: <https://encurtador.com.br/KhAa7>. Acesso em: 10 jul. 2025.

TEIXEIRA, Mateus da Silva; PRIETO, Raidel Báez. Eventos Extremos de Chuva no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, entre 2004 e 2013. Parte 1: Definição dos Eventos e Estatísticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. I.], v. 35, p. 45–52, 2020a. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/XxSYqbcvVF5KZr6QHpBCv4m/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

TOMAZELLI, José Luiz; WILLWOCK, Jorge Alberto. Cenozoico Costeiro do rio Grande do Sul. In: **GEOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL**. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2000. p. 375–406. Disponível em: <https://encurtador.com.br/JgZvo>. Acesso em: 8 jul. 2025.

TOMAZELLI, Luiz José; WILLWOCK, Jorge Alberto. Quaternary geological evolution of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. [s. I.], v. 68, p. 373–382, 1996. Disponível em: <https://shre.ink/xbpK>. Acesso em: 19 jun. 2025. Acesso em: 8 jul. 2025.

TOMINAGA, L. K. et al. (org.). Desastres naturais: conhecer para prevenir. 1a. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196 p. Disponível em: <https://encurtador.com.br/fgLF4>. Acesso em: 23 jul. 2025.

USGS. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). , 2000. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

USGS. Geological Survey. Landslide Types and Processes. Factsheet 2004- 3072, 2004, 4p. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

WILDNER, Wilson et al. **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul**. [S. I.]: CPRM, 2008. Technical Report. Disponível em: <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/10301>. Acesso em: 8 jul. 2025.

WILLWOCK, Jorge Alberto. Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A Synthesis. **Pesquisas em Geociências**, [s. I.], v. 16, n. 16, p. 5–49, 1984. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/article/view/21711>. Acesso em: 8 jul. 2025.

WYLES, Hannah M. E. et al. A Novel Approach to Using Seabed Geomorphology as a Predictor of Habitat Use in Highly Mobile Marine Predators: Implications for Ecology and Conservation. **Frontiers in Marine Science**, [s. I.], v. 9, 2022. DOI:10.3389/fmars.2022.818635.

ZALÁN, Pedro Victor *et al.* The Paraná Basin, Brazil. *In: LEIGHTON, Morris W. *et al.* (org.). Interior Cratonic Basins.* [S. l.]: American Association of Petroleum Geologists, 1990. v. 51, p. 0. Disponível em: <https://doi.org/10.1306/M51530C34>. Acesso em: 8 jul. 2025.

ZHENGMING, Wan; HOOK, Simon; HULLEY, Glynn. MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061. Earth Science Data Systems, NASA, , 2025.

Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod11a1-061>. Acesso em: 18 jun. 2025.