

PROPOSTA DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL AOS DESASTRES NATURAIS – CASO RODOVIA BR-280, EM SANTA CATARINA

JESSICA PRATS RASPINI

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

LUCILA MARIA DE SOUZA CAMPOS

CAROLINE HELENA ROSA LOPES

Introdução

O modal rodoviário possui participação predominante na matriz de transporte de cargas e pessoas no Brasil, sendo responsável por 66,2% das cargas regionais transportadas nacionalmente (EPL, 2021). Contudo, as mudanças climáticas têm ocasionado efeitos significativos sobre a infraestrutura das rodovias (BLES, 2015). Os impactos nas rodovias variam de acordo com as vulnerabilidades características de cada via. Identificar a vulnerabilidade da via, portanto, é necessário para a adaptação da mesma aos efeitos dos extremos climáticos (UNTERSTELL, 2017; BLES, 2015).

Problema de Pesquisa e Objetivo

A rodovia BR-280, em Santa Catarina, liga o litoral norte com o oeste do estado, totalizando 316,4 km de extensão. Tal rodovia é de significativa importância no contexto socioeconômico para o estado. Todavia, diversos trechos da BR-280/SC têm sido constantemente afetados pelas chuvas intensas e demais eventos climáticos extremos. Desta forma, o objetivo principal do presente estudo consiste em propor um método de mapeamento da vulnerabilidade ambiental das rodovias. A indicação dos trechos críticos auxilia o processo de gestão das vias.

Fundamentação Teórica

A vulnerabilidade da malha rodoviária é descrita como uma medida de suscetibilidade a desastres meteorológicos e da incapacidade de resistir aos efeitos adversos e restaurar sua condição inicial (YANG et al., 2013). Ainda, a vulnerabilidade da malha rodoviária é função da exposição e da capacidade adaptativa do sistema, sendo que a determinação da exposição é necessária para subsidiar a definição de critérios para a escolha dos elementos da infraestrutura rodoviária com potencial de serem afetados negativamente pelos efeitos da mudança climática (FHWA, 2012).

Metodologia

O método empregou o Processo de Análise Hierárquica (AHP) e o Sistema de Informação Geográfica (SIG) a fim de identificar os níveis de vulnerabilidade aos quais a rodovia BR-280 está sujeita, levando em consideração características naturais (declividade do terreno, geologia, pedologia, cobertura vegetal, hidrologia e precipitação do local de estudo) e antrópicas (uso e ocupação da terra e volume médio diário de tráfego) da via.

Análise dos Resultados

A maior parte da BR-280/SC foi classificada como alta vulnerabilidade ambiental (48%), seguida pelas classes de média (43,9%) e muito alta (8,1%). Não foram identificadas regiões de baixa e muito baixa vulnerabilidade ambiental. Constata-se que as áreas classificadas como muito alta vulnerabilidade ambiental estão concentradas, principalmente, no município de Guarimirim. Os municípios de Araquari, Jaraguá do Sul, Rio Negrinho e Mafra também apresentam locais de muita alta vulnerabilidade ambiental. Destaca-se, o alto volume de chuva, 2.174 mm a 2.350 mm, ao qual parte desta região está sujeita

Conclusão

O estudo indica os trechos críticos da BR-280, em Santa Catarina, que merecem a devida atenção por parte dos órgãos responsáveis pela gestão das rodovias federais, de modo a amenizar prejuízos e evitar as adversidades. O método aplicado neste estudo se mostrou simples e efetivo, podendo ser replicado em outras rodovias devido à relevância das variáveis selecionadas para compor o modelo. O método proposto é capaz de caracterizar a área de estudo e prover informações rápidas, estratégicas e relevantes para a gestão da malha rodoviária brasileira.

Referências Bibliográficas

BERDICA, KATJA. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, v. 9, n. 2, 2002, p. 117-127.
BLES, Thomas; BESSEMBINDER, Janette; CHEVREUIL, Martial; DANIELSSON, Per; FALEMO, Stefan; VENMANS, Arjan. ROADAPT: roads for today, adapted for tomorrow. CEDR, 2015. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework. 2012. YANG, J; SUN, H.; WANG, L. LI, L; WU, B. Vulnerability Evaluation of the Highway Transportation System against Meteorological Disasters. *Procedia - Social and Behav*

Palavras Chave

Rodovia, vulnerabilidade ambiental, mudanças climáticas

PROPOSTA DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL AOS DESASTRES NATURAIS – CASO RODOVIA BR-280, EM SANTA CATARINA

1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário possui participação predominante na matriz de transporte de cargas e pessoas no Brasil. Segundo o Plano Nacional de Logística 2035 (EPL, 2021), o modo rodoviário é responsável por 66,2% das cargas regionais transportadas no país, considerando a divisão por tonelada-quilômetro útil (TKU). Esse percentual sobe para 83,25% ao considerar o valor-quilômetro útil, o que demonstra que as rodovias são a maior via de escoamento de bens de alto valor no Brasil. A infraestrutura rodoviária, portanto, é vital para a sociedade e para o desenvolvimento e competitividade de um país (UNTERSTELL, 2017; BLES, 2015). Contudo, as mudanças climáticas têm ocasionado efeitos significativo sobre a infraestrutura das rodovias (BLES, 2015). Conseqüentemente, acarretando impactos indiretos em outros setores da economia, dependentes da infraestrutura de transportes (BRASIL, 2015).

Eventos climáticos extremos ocasionados pelas mudanças climáticas podem ocasionar i) inundação das vias, pontes e túneis, ii) catástrofes decorrentes de movimentos de massa e erosão do solo, iii) prejuízos na sinalização de rodovias e pontes, entre outros. O processo de deterioração das estradas é acelerado por esses eventos, fato que aumenta o risco de ocorrências como colapso e interrupção da pista e isolamento de cidades, ocasionando prejuízos socioeconômicos e transtornos para a população, além de possíveis fatalidades (UNTERSTELL, 2017; BLES, 2015; EC, 2012). As condições meteorológicas adversas implicam também em um aumento no tempo médio de viagem, além de um maior custo na logística de distribuição de bens e dificuldade de acesso a serviços (SANTOS; RIBEIRO, 2015).

Os impactos nas rodovias variam de acordo com as vulnerabilidades características de cada via. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas define vulnerabilidade como o grau pelo qual um sistema é suscetível ou incapaz de enfrentar efeitos adversos da mudança climática, incluindo a variabilidade e os extremos do clima. A vulnerabilidade é, portanto, função do caráter, magnitude e rapidez da mudança climática e da variação a que um sistema está exposto, de sua sensibilidade e sua capacidade de adaptação (IPCC, 2001). Identificar a vulnerabilidade da via, portanto, é necessário para a adaptação da mesma aos efeitos dos extremos climáticos (UNTERSTELL, 2017; BLES, 2015). Neste contexto, torna-se relevante a seleção de critérios para a avaliação da vulnerabilidade, a fim de mapear os trechos críticos de uma rodovia, ou seja, aqueles ambientalmente vulneráveis aos desastres naturais.

Na data de 10 de abril de 2012, foi instituída a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), Lei nº 12.608/2012 (BRASIL, 2012). Segundo as diretrizes da PNPDEC, o gerenciamento de riscos e de desastres deve abranger as ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação. Em consonância, o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA) foi instituído no dia 10 de maio de 2016, através da Portaria no 150 (BRASIL, 2016). Trata-se de um instrumento que tem por objetivo promover a redução da vulnerabilidade nacional à mudança do clima e realizar a gestão do risco associado a esse fenômeno (MMA, 2016). O PNA apresenta estratégias de adaptação propostas para os setores e temas elencados como prioritários para o desenvolvimento sustentável do País, dentre os quais, destacam-se os setores de Infraestrutura e Transportes.

A rodovia BR-280, em Santa Catarina, liga o litoral norte com o oeste do estado, totalizando 316,4 km de extensão (FIESC, 2016). Tal rodovia é de significativa importância no contexto

socioeconômico para o estado. Todavia, diversos trechos da BR-280/SC têm sido constantemente afetados pelas chuvas intensas e demais eventos climáticos extremos. Neste contexto, o mapeamento dos trechos da rodovia BR- 280/SC mais vulneráveis aos desastres naturais é processo fundamental para a gestão dos impactos. Neste contexto, a indicação dos trechos críticos auxilia no direcionamento de recursos financeiros para a manutenção e fomento da resiliência da rodovia. Desta forma, o objetivo principal do presente estudo consiste em propor um método de mapeamento de vulnerabilidade ambiental aplicável às rodovias, tendo como caso de estudo a rodovia BR-280 em Santa Catarina.

O método empregou o Processo de Análise Hierárquica (AHP) e o Sistema de Informação Geográfica (SIG) a fim de identificar os níveis de vulnerabilidade aos quais a rodovia BR-280 está sujeita, levando em consideração características naturais (declividade do terreno, geologia, pedologia, cobertura vegetal, hidrologia e precipitação do local de estudo) e antrópicas (uso e ocupação da terra e volume médio diário de tráfego) da via.

O restante do trabalho está estruturado da seguinte forma: a seção a seguir apresenta a fundamentação teórica a cerca dos desastres e da vulnerabilidade da malha rodoviária. Em seguida, são descritos os métodos e técnicas de pesquisa empregados (Seção 3). A Seção 4 apresenta os resultados do estudo. Por fim, as considerações finais são descritas na Seção 5.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Desastres

Os desastres são definidos como “uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou sociedade, causando significativas perdas sociais, materiais, econômicas ou ambientais, que excedem a habilidade da comunidade ou sociedade afetada de lidar usando seus recursos próprios. Ele é o resultado da combinação da exposição perigos, das condições de vulnerabilidade e das insuficientes capacidades de medir ou reduzir as potenciais consequências negativas do risco” (UNISDR, 2009). Nacionalmente, a classificação oficial dos desastres é estabelecida pelo Anexo I da Instrução Normativa nº 01, de 24 de agosto de 2012, do Ministério da Integração Nacional (IN-MI nº 01/2012):

Desastre: resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem sobre um cenário vulnerável, causando grave perturbação ao funcionamento de uma comunidade ou sociedade envolvendo extensivas perdas e danos humanos, materiais, econômicos ou ambientais, que excede a sua capacidade de lidar com o problema usando meios próprios (IN-MI nº 01/2012 - Capítulo I Art. 1º).

A intensidade de um desastre depende da interação entre a magnitude do evento adverso e a vulnerabilidade do sistema, sendo quantificada em função dos danos e prejuízos (BRASÍLIA, 1998). Os desastres naturais recorrentes de precipitação pluviométrica intensa, como inundação, enxurrada, alagamento, movimento de massa e erosão, são alguns dos eventos extremos que podem acometer as rodovias. Tais eventos são descritos a seguir (EM-DAT, 2022; BRASÍLIA, 1998):

- Inundação: expressão genérica para o transbordamento de água, em níveis acima do normal, do leito usual do rio em direção às planícies de inundação ou leitos de inundação;

- Enxurrada: rápidas inundações fluviais que ocorrem devido à precipitação intensa, sendo de curta duração;
- Alagamento: água acumulada no leito das ruas e no perímetro urbano por fortes precipitações pluviométricas, em cidades com sistemas de drenagem deficientes;
- Movimento de massa: qualquer tipo de movimentação do solo, com velocidade de moderada à rápida, incluindo deslizamentos de terra e fluxos de detritos; e
- Erosão: desagregação e remoção do solo ou de rochas, pela ação da água, vento, gelo e/o organismos (plantas e animais).

2.2 Vulnerabilidade da malha rodoviária

A vulnerabilidade é conceituada como o “grau pelo qual um sistema é suscetível ou incapaz de enfrentar efeitos adversos da mudança climática, incluindo a variabilidade e os extremos do clima. A vulnerabilidade é, portanto, função do caráter, magnitude e rapidez da mudança climática e da variação a que um sistema está exposto, de sua sensibilidade e sua capacidade de adaptação” (IPCC, 2001). Ainda, a vulnerabilidade é complexa, uma vez que é específica e seus parâmetros variam de acordo com a escala geográfica (DE LEÓN, 2006).

Neste contexto, a vulnerabilidade da malha rodoviária é descrita como uma medida de suscetibilidade a desastres meteorológicos e da incapacidade de resistir aos efeitos adversos e restaurar sua condição inicial (YANG et al., 2013). Berdica (2002) define a vulnerabilidade de uma rede rodoviária como a suscetibilidade a incidentes que possam reduzir consideravelmente a capacidade de oferecer serviço dessa rede. Ainda, a vulnerabilidade da malha rodoviária é função da exposição e da capacidade adaptativa do sistema, sendo que a determinação da exposição é necessária para subsidiar a definição de critérios para a escolha dos elementos da infraestrutura rodoviária com potencial de serem afetados negativamente pelos efeitos da mudança climática (FHWA, 2012).

A vulnerabilidade, portanto, é um indicador negativo do desempenho do sistema durante a gestão de desastres (UNISDR, 2009). A confiabilidade de uma malha rodoviária é proporcional à eficiência com que a sua infraestrutura resiste às ocorrências e com que sucesso seus serviços podem ser restaurados após um desastre (HSIEH; FENG, 2020).

Nos últimos anos, a temática de vulnerabilidade e resiliência da malha rodoviária tem recebido maior atenção, evidenciando sua relevância frente a necessidade de reduzir os riscos do setor de transporte aos desastres naturais (HSIEH; FENG, 2020; BRASIL, 2015).

2.3 Processo Analítico Hierárquico aplicado às áreas de transporte e meio ambiente

Processos de decisão complexos envolvem diversos critérios relacionados a diferentes alternativas. O Método de Auxílio à Tomada de Decisão por Múltiplos Critérios (em inglês, *Multiple Criteria Decision Making* - MCDM) constitui um conjunto de métodos que padronizam o processo de tomada de decisão através da modelagem matemática e auxiliam o avaliador no sistema decisório, por meio da priorização de alternativas na presença de múltiplos critérios, reduzindo a incerteza e melhorando a qualidade das decisões (MARDANI et al., 2015).

O Processo Analítico Hierárquico (do inglês, *Analytic Hierarchy Process* - AHP) é um método multicriterial de apoio à tomada de decisão que permite lidar com problemas complexos, através da definição de prioridades. O AHP foi desenvolvido na década de 1970 pelo professor Thomas Saaty, Universidade da Pensilvânia, para solucionar um problema de contingência para o

Departamento de Defesa dos Estados Unidos (SAATY, 1990). No processo de decisão, o AHP incorpora julgamentos e valores pessoais, tendo como princípio a experiência e o conhecimento dos avaliadores.

A metodologia do AHP consiste em cinco etapas: (i) subdivisão do problema de decisão em seus fatores componentes; (ii) hierarquização destes fatores; (iii) determinação da importância relativa de cada fator através da atribuição de valores numéricos; (iv) elaboração da matriz de comparação; e (v) cálculo do autovetor normalizado com o respectivo peso de cada fator. Maiores informações sobre o processo de análise hierárquica são fornecidas em Saaty e Vargas (2012).

Nas áreas de transporte e desastres, identificou-se a ampla utilização do Processo Analítico Hierárquico. O AHP foi empregado em estudos de avaliação de risco de desastre geológico de túneis super longos (LI et al., 2022), no mapeamento da vulnerabilidade de rodovias aos deslizamentos de terra (PANCHAL; SHRIVASTAVA, 2022; BANERJEE et al., 2018), na avaliação do risco de inundação em rodovias (GOUMRASA et al., 2021) e no estudo da vulnerabilidade do sistema de transporte rodoviário aos desastres meteorológicos (YANG et al., 2013).

3. MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA

3.1 Descrição do local de estudo

A rodovia BR-280, em Santa Catarina, liga o litoral norte com o oeste do estado, totalizando 316,4 km de extensão. A BR-280 inicia seu traçado no município de São Francisco do Sul, passando pelos municípios de Araquari, Guarimirim, Jaraguá do Sul, Corupá, São Bento do Sul, Rio Negrinho, Mafra, Três Barras, Canoinhas e Irineópolis, e se encerra no município de Porto União (FIESC, 2016). Tal rodovia é de significativa importância no contexto socioeconômico para o estado de Santa Catarina. Uma parcela expressiva dos municípios supracitados possui a base de sua economia voltada para a indústria e utilizam a rodovia como rota de escoamento da produção local, especialmente das regiões oeste e norte de Santa Catarina em direção aos portos de São Francisco do Sul, Itajaí e Itapoá. Diariamente, safras agrícolas e produtos industrializados como motores, móveis, metalurgia, têxtil, borracha e alimentos são transportados pela BR-280 (MUELLER, 2021). Contudo, diversos trechos da BR-280/SC têm sido frequentemente afetados pelas chuvas intensas e demais eventos extremos, o que ocasiona prejuízos socioeconômicos, compromete a logística de transporte no escoamento de bens e produtos da região e afeta a população que necessita da rodovia para seus deslocamentos diário (Figura 1).

Figura 1 - Ocorrência no km 93 da rodovia BR-280, trecho São Bento do Sul - Corupá

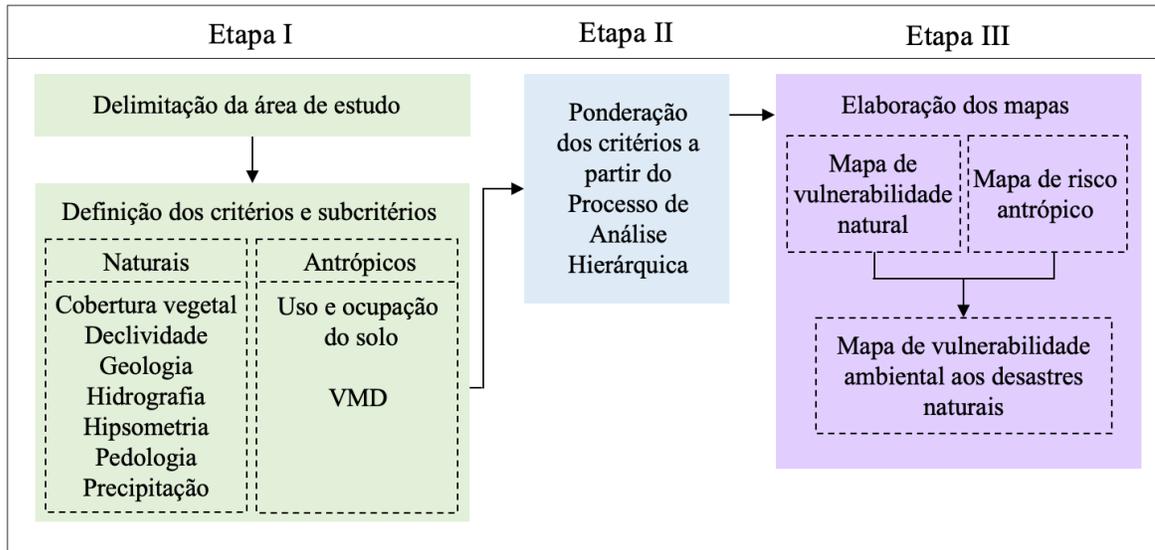


Fonte: Theiss (2014)

3.2 Etapas da pesquisa

Para a elaboração do diagnóstico das áreas ambientalmente vulneráveis aos desastres naturais, um fluxograma metodológico foi idealizado, contemplando três macro etapas (Figura 2).

Figura 2 - Macro-fases do estudo



3.2.1 Etapa I - Definição dos critérios e subcritérios

A vulnerabilidade de um geossistema pode ser avaliada a partir das características dos meios físicos (solo, rocha, relevo, clima e recursos hídricos), bióticos (tipo de vegetação) e antrópico (uso e ocupação da terra), que tornam o relevo mais ou menos instável ou sujeito a processos erosivos (LIMA et al., 2000). Neste contexto, o presente estudo adaptou o método empregado por Santos (2014), pelo qual o mapa de vulnerabilidade ambiental foi construído a partir da sobreposição dos mapas de vulnerabilidade natural e risco antrópico.

O mapa de vulnerabilidade natural foi, portanto, elaborado a partir de sete variáveis, sendo elas: geologia, pedologia, geomorfologia, declividade, altimetria, cobertura vegetal, hidrografia e precipitação. Acrescentou-se a precipitação como um indicador considerado relevante para discriminar as áreas de fragilidade natural, pois a mesma está diretamente relacionada à ocorrência de desastres em trechos da BR-280/SC. A construção do mapa de risco antrópico foi embasada em duas variáveis: uso e ocupação da terra e vias de acesso. Para caracterizar as vias de acesso no presente estudo, optou-se por utilizar o indicador Volume Médio Diário (VMD), o qual é conceituado como o volume ou tráfego registrado no período de um dia ou 24h. A descrição dos critérios é apresentada no Anexo A. Os subcritérios considerados no estudo estão representados Tabela 2.

3.2.2 Etapa II - Ponderação dos critérios e método multicritério

Primeiramente, cada subcritério das variáveis selecionadas recebeu um peso de acordo com uma escala de 1 à 10, na qual 10 representa o valor de maior influência quanto a vulnerabilidade e 1, o menor valor. Os pesos dos subcritérios foram definidos de acordo com duas classes de desastres: aqueles advindos de inundações, enxurradas e alagamentos; e os originados dos movimentos de massa e erosão. Essa divisão se mostrou necessária por considerar que alguns dos critérios possuem influências opostas de acordo com a classe do fenômeno. Dessa forma, o mapa de vulnerabilidade natural é resultante da soma algébrica do i) mapa de vulnerabilidade natural às inundações, enxurradas e alagamentos e do ii) mapa de vulnerabilidade natural aos movimentos de massa e erosão (Anexo C). O peso atribuído a cada subcritério é descrito na Tabela 2.

Em seguida, fez-se necessário ponderar a importância dos sete critérios ambientais e dos dois critérios antrópicos. Para os critérios ambientais, fez-se uso do Processo de Análise Hierárquica (em inglês, *Analytic Hierarchy Process* - AHP), proposto por Saaty (1990). O julgamento foi realizado por um conjunto de cinco especialistas das áreas de geografia, arquitetura, engenharia ambiental, engenharia de transportes e engenharia civil. O software *Expert Choice* foi utilizado para a obtenção da escala hierárquica dos critérios. A pontuação final representa a média do julgamento dos avaliadores.

Em relação à hierarquização das condicionantes do mapa de risco antrópico, a importância de cada critério não foi estimada através da metodologia AHP, a qual necessita ao menos três critérios para a realização da comparação pareada. Neste contexto, os pesos das classes foram obtidos através da média do julgamento dos especialistas.

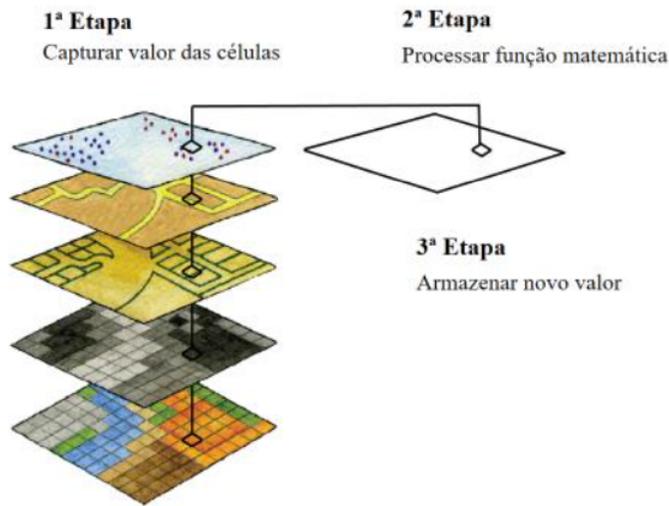
3.2.3 Etapa III - Elaboração dos mapas

A última etapa do estudo foi dedicada à construção dos mapas. A imagem de satélite foi utilizada a fim de caracterizar o ambiente quanto às suas diversas formas de uso e ocupação da terra. As imagens em alta resolução espacial são disponibilizadas por meio da interface do software *Google Earth Pro*, através do qual é possível a elaboração de mapas com grande precisão e detalhamento. Utilizou-se imagem de satélite datada de 13 de dezembro de 2015. Somado a isso, fez-se necessário a utilização do software ArcGIS para o georreferenciamento da imagem de satélite; manipulação das bases de dados disponíveis; elaboração dos mapas temáticos e aplicação da rotina para a composição dos mapas de vulnerabilidade natural, risco antrópico e vulnerabilidade ambiental.

O traçado linear da rodovia BR-280, em Santa Catarina, tem como fonte a base de dados geográficos de rodovias do DNIT, disponibilizados pela instituição em 2015. Para a composição dos mapas, optou-se por um *buffer* linear de três quilômetros a partir da rodovia devido à propriedade de liquefação do solo: quando carregados, alguns tipos de solo tendem a sofrer repentinamente uma transição do estado sólido para o estado líquido. Dessa forma, as chamadas “corridas de lama” podem se deslocar a quilômetros de distância do local de origem e afetar a região do entorno.

Por fim, o mapa da vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais é o produto da sobreposição dos mapas de vulnerabilidade natural e risco antrópico. Na fase operacional, os mapas são obtidos por meio do cruzamento espacial dos nove subcritérios a partir da álgebra de mapas do ArcGIS. O processo é realizado por meio da ferramenta *Raster Calculator*, através de três etapas consecutivas, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma da álgebra de mapas



Fonte: adaptado de Viconsaga (2017).

A primeira etapa da álgebra de mapas consiste na captura dos valores das células contidos no arquivo referente às classes dos mapas preliminares. Na sequência, esses valores são processados algebricamente tomando como base as equações abaixo, nas quais X_n são os pesos estatísticos previamente obtidos.

$$VN = X_1 * CoberturaVegetal + X_2 * Declividade + X_3 * Geologia + X_4 * Hidrografia + X_5 * Hipsometria + X_6 * Pedologia + X_7 * Pluviometria$$

$$RA = X_8 * Uso e Ocupação + X_9 * VMD$$

$$VA = VN + RA$$

Onde:

VN = vulnerabilidade natural,

RA = risco antrópico e,

VA = vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais.

Posteriormente, o valor de cada célula é armazenado em um novo arquivo *raster*, o qual origina o mapa de vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais. As novas células contêm valores que variam de 0 a 10, onde os valores mais próximos de zero são referentes às áreas com menor vulnerabilidade ambiental e os valores mais próximos de 10, com maior vulnerabilidade. Por último, procede-se a construção do mapa semafórico através da reclassificação dos valores das células em cinco categorias hierárquicas: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Reordenação das classes de vulnerabilidade

Valores das células	Vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais
0 a 2	Muito baixa
2,1 a 4	Baixa
4,1 a 6	Média
6,1 a 8	Alta
8,1 a 10	Muito alta

Uma descrição aprofundada do procedimento de elaboração dos nove mapas primários (sete critérios de vulnerabilidade ambiental e dois critérios de risco antrópico) é disponibilizada no Anexo B.

4. RESULTADOS DO ESTUDO

Os pesos atribuídos aos critérios e subcritérios são apresentados na Tabela 2. Quanto à ordem de importância dos critérios, resultante do Processo de Análise Hierárquica, obteve-se em primeiro lugar a vegetação (29,9%), seguido pela precipitação (23,9%), solos (14,3%), geologia (13,2%), hidrografia (10,0%), declividade (6,6%) e altitude (2%). Em relação ao risco antrópico, o critério uso e ocupação do solo (60,0%) tem maior peso frente ao volume médio diário de tráfego na rodovia (40,0%).

Tabela 2 - Pesos atribuídos aos critérios e subcritérios

Mapa	Critério	Peso	Subcritério	Pesos	
				Movimento de massa e erosão	Inundação, alagamento e enxurrada
Vulnerabilidade natural	Cobertura vegetal	0,299 (X ₁)	Campos com capões	6	6
			Campos de inundações	7	7
			Floresta nebulosa	4	4
			Floresta ombrófila densa	2	2
			Floresta ombrófila mista	3	3
			Vegetação litorânea	1	1
	Declividade	0,066 (X ₂)	0 a 3%	4	10
			3,1 a 8%	6	8
			8,1 a 20%	8	6
			20,1 a 39%	10	4
	Geologia	0,132 (X ₃)	Botucatu	10	2
			Campo Alegre – F. Corupá	10	2
			Campo Alegre - outras	10	2
			Campo Mourão	10	2
			Complexo Granulítico SC	10	2
			Depósitos aluvionares	2	10
			Depósitos litorâneos	2	10
			Granito Corupá	10	2
			Granito São Francisco do Sul	10	2
Irati			2	10	
Palermo			10	2	
Rio Bonito			8	8	

Tabela 2 - Pesos atribuídos aos critérios e subcritérios (continuação)

Mapa	Critério	Peso	Subcritério	Pesos	
				Movimento de massa e erosão	Inundação, alagamento e enxurrada
Vulnerabilidade natural	Geologia	0,132 (X ₃)	Rio do Rasto	10	2
			Serra Alta	10	2
			Serra Geral	10	2
			Taciba	10	2
			Teresina	10	2
	Hidrografia	0.100 (X ₄)	-	-	-
	Hipsometria	0,020 (X ₅)	100 a 200 m	1	10
			201 a 300 m	2	9
			301 a 400 m	3	8
			401 a 500 m	4	7
			501 a 600 m	5	6
			601 a 700 m	6	5
			701 a 800 m	7	4
			801 a 900 m	8	3
			901 a 1000 m	9	2
			1001 a 1100 m	10	1
	Pedologia	0,143 (X ₆)	Areias quartzosas marinhas	4	10
			Cambissolo e Podzólico v-a	10	4
			Dunas e areias das praias	4	10
			Glei	4	10
Latossolo bruno / vermelho			8	8	
Podzol			4	10	
Pluviometria	0,239 (X ₇)	1.559 a 1.708 mm	6	6	
		1.709 a 1.841 mm	7	7	
		1.842 a 1.993 mm	8	8	
		1.994 a 2.173 mm	9	9	
		2.174 a 2.350 mm	10	10	
Risco Antrópico	Uso e ocupação do solo	0,600 (X ₈)	Massa d'água	4	6
			Vegetação	6	4
			Agricultura / solo exposto	8	8
			Área urbana	10	10
	VMD*	0,400 (X ₉)	3.318 a 4.244 veículos/dia	2	2
			4.245 a 6.080 veículos/dia	4	4
			6.081 a 7.170 veículos/dia	6	6
			7.171 a 10.860 veículos/dia	7	7
			10.861 a 13.180 veículos/dia	9	9
			13.191 a 21.750 veículos/dia	10	10

*Volume Médio Diário de tráfego

Conforme o fluxograma apresentado na Figura 2, o processo de elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental é precedido por outros dois mapas: vulnerabilidade natural e risco antrópico. A Figura 4, portanto, apresenta as classes de vulnerabilidade natural da rodovia BR-280, em Santa Catarina. A área de estudo apresenta em sua maior parte (78,9%) uma média vulnerabilidade natural aos desastres. A classe de vulnerabilidade natural alta compreende 21,1% da área total. Não foram identificadas áreas de muito baixa, baixa e muito alta vulnerabilidade natural. A Figura 7 exibe a distribuição das classes de vulnerabilidade natural para a rodovia BR-280, em Santa Catarina. Conforme o mapa de vulnerabilidade natural aos desastres, as áreas com

maior vulnerabilidade estão localizadas nas porções central, extremo leste e extremo oeste da rodovia, abrangendo os municípios de São Francisco do Sul, Araquari, Guaramirim, Jaraguá do Sul, Corupá, Mafra e Porto União.

A Figura 5 apresenta as classes de risco antrópico aos desastres naturais para a rodovia BR-280, em Santa Catarina. A área de estudo apresenta em sua maior parte (54,8%) um médio risco antrópico aos desastres naturais. As classes de risco antrópico baixo e alto compreendem 0,5% e 37,2%, respectivamente. Já a classe de risco antrópico muito alto representa 7,5% do total da área de estudo e se concentra, principalmente, nos municípios de Araquari, Guaramirim, Jaraguá do Sul, Rio Negrinho e Mafra. Não foram identificadas áreas de muito baixo risco antrópico. A

Figura 8 apresenta a distribuição das classes de risco antrópico para a área de estudo.

Figura 4 - Classes de vulnerabilidade natural da BR - 280/SC

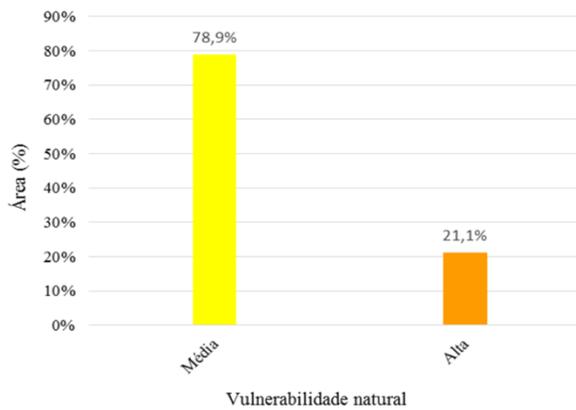
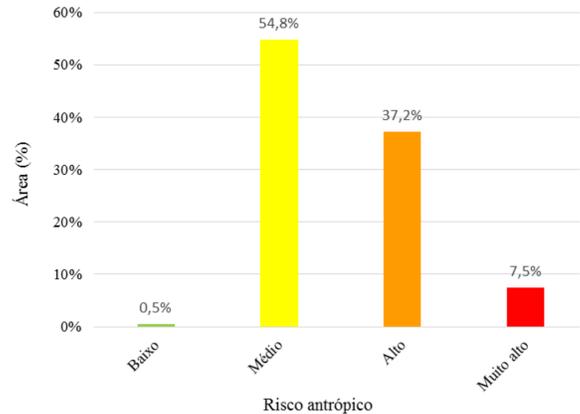


Figura 5 - Classes de risco antrópico da BR-280/SC



A Figura 6 apresenta as classes de vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais para a rodovia BR-280, em Santa Catarina. A área de estudo apresenta em sua maior parte (48,0%) uma alta vulnerabilidade ambiental aos desastres. As classes de vulnerabilidade ambiental média e muito alta compreendem 43,9% e 8,1%, respectivamente. Não foram identificadas áreas de muito baixa e baixa vulnerabilidade ambiental.

Figura 6 - Classes da vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais da BR-280/SC

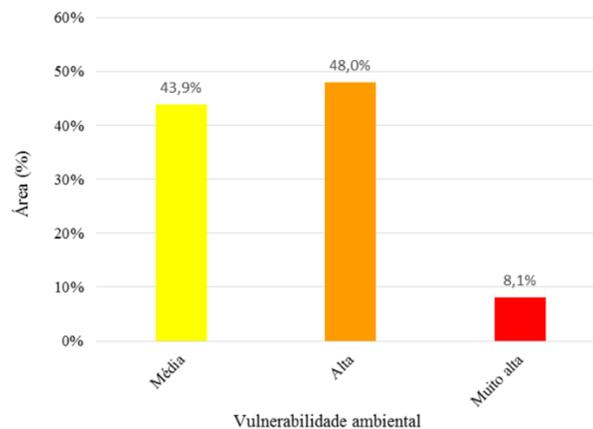


Figura 7 – Vulnerabilidade natural da BR-280, em Santa Catarina

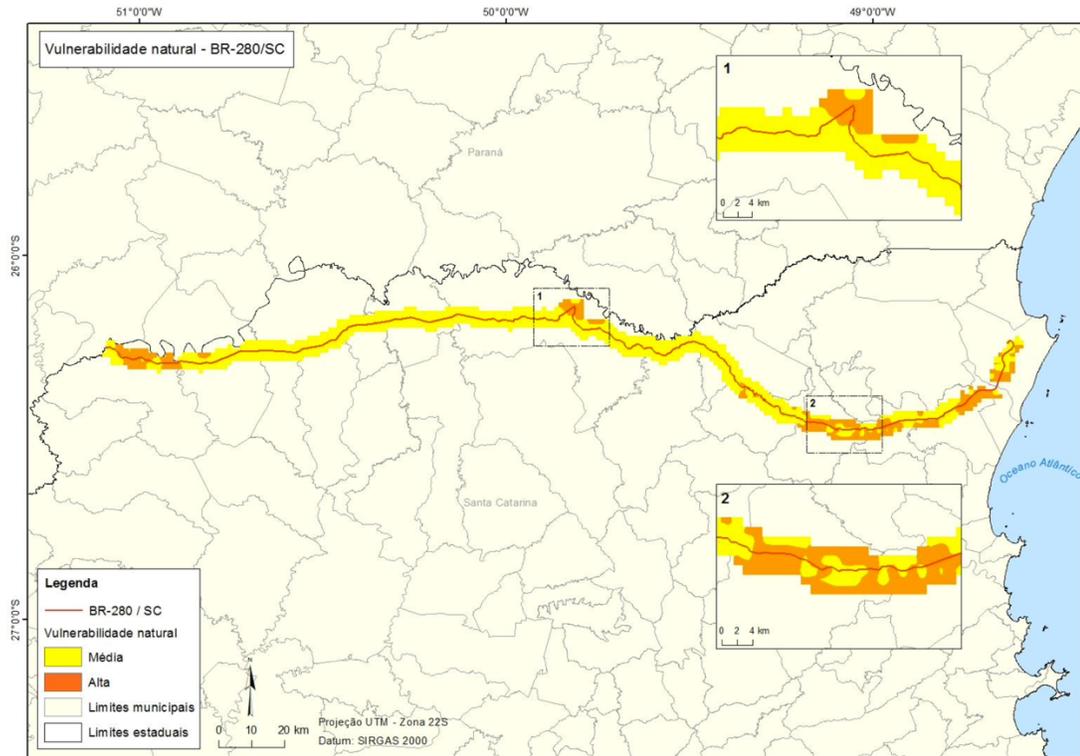
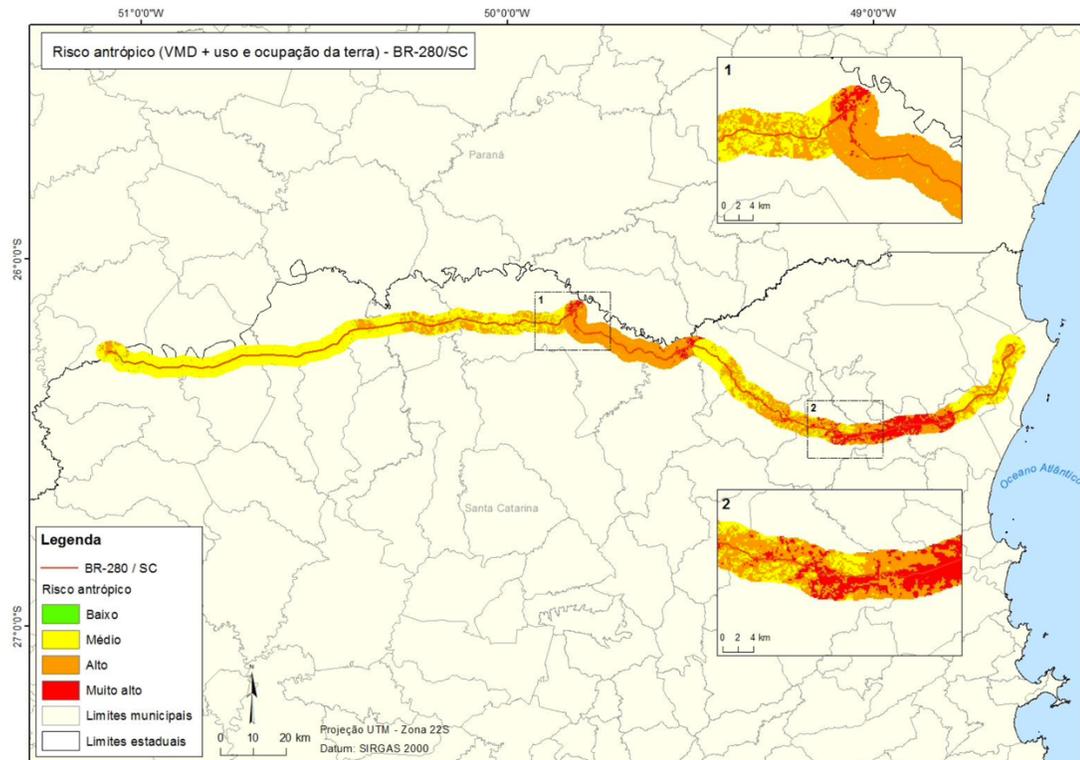
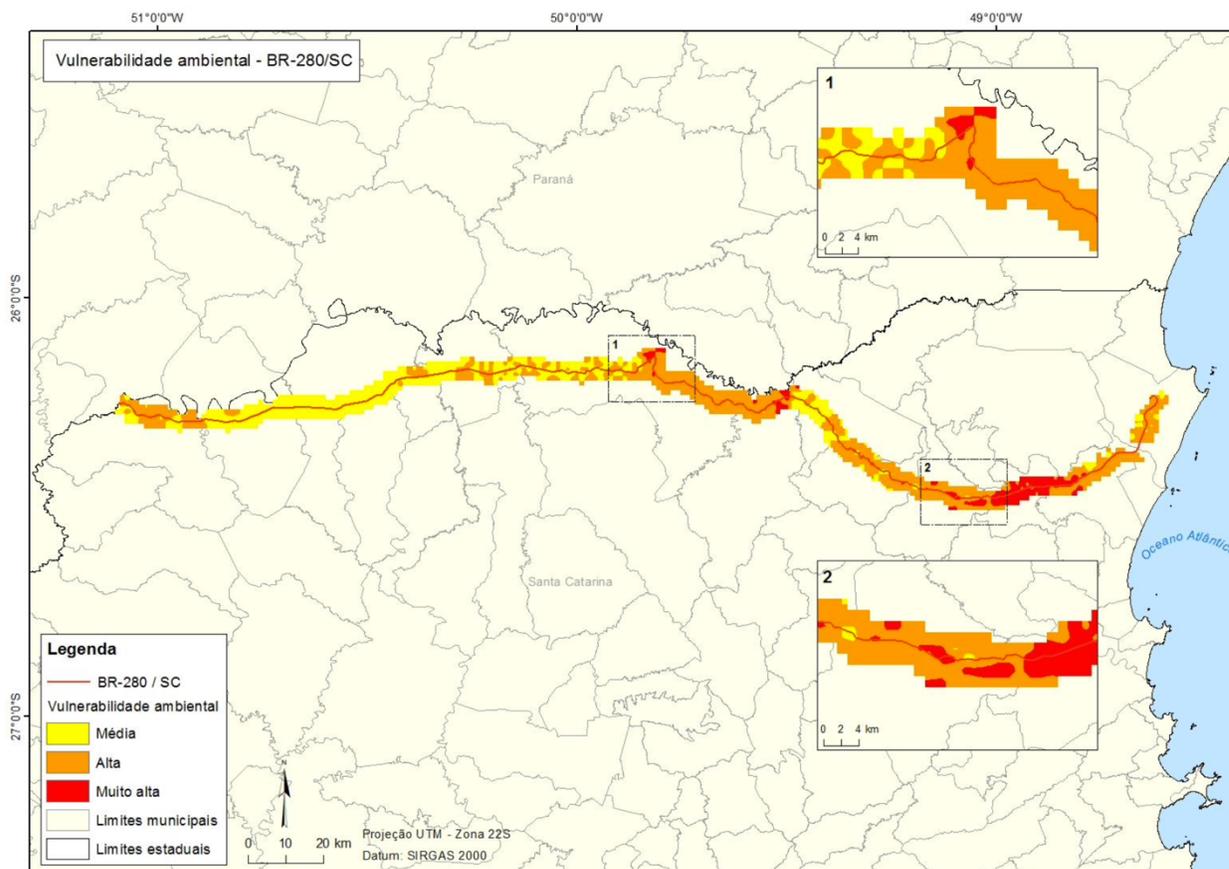


Figura 8 – Risco Antrópico da BR-280, em Santa Catarina



O mapa de vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais para a rodovia BR-280/SC, produto final deste estudo, é apresentado a seguir (Figura 9).

Figura 9 - Vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais da BR-280, em Santa Catarina



As áreas com muito alta vulnerabilidade estão concentradas, principalmente, no município de Guarimirim. Os municípios de Araquari, Jaraguá do Sul, Rio Negrinho e Mafra também apresentam locais de muita alta vulnerabilidade ambiental. Já os municípios de Canoinhas e Iriepópolis possuem quase a totalidade de suas áreas classificadas como média vulnerabilidade ambiental.

A classe de vulnerabilidade ambiental muito alta tem predomínio de altitude variando de 100 a 200 metros (80,6%) e relevo plano (85,4%). Na estrutura geológica, destaca-se o Complexo Granulítico Santa Catarina (37,5%). Quanto à pedologia, prevalece a associação dos solos cambissolo e podzólico vermelho-amarelo (70,9%). A cobertura vegetal é composta por campos com capões, floresta ombrófila densa e floresta ombrófila mista (ambas com 33,3%); e o uso e ocupação da terra se caracterizam pela presença do solo exposto e agricultura (57,0%). O Volume Médio Diário de tráfego se concentra na faixa de 9.080 a 10.860 veículos/dia (41,7%). Já em relação à precipitação, o maior volume de chuva, 2.174 mm a 2.350 mm, é o mais representativo nesta classe (69,2%).

Já para a classe de vulnerabilidade alta, predominam altitudes variando de 800 a 900 metros (39,2%), relevo plano (88,1%), depósitos aluvionares (22,6%), floresta ombrófila densa (36,3%), assim como a associação dos solos cambissolo e podzólico vermelho-amarelo (63,2%). O uso e ocupação da terra se caracterizam pela presença do solo exposto e agricultura (48,2%). O Volume Médio Diário de tráfego se concentra na faixa mais baixa, de 3.318 a 4.244 veículos/dia (31,8%). Já em relação à precipitação, o menor volume de chuva, 1.559 mm a 1.708 mm, é o mais representativo nesta classe (58,9%).

Por último, a classe de vulnerabilidade média tem predomínio de altitudes variando de 700 a 800 m (43,7%), relevo plano (89,0%), depósitos aluvionares (27,0%), floresta ombrófila densa (57,1%), assim como a associação dos solos cambissolo e podzólico vermelho-amarelo (50,9%). O uso e ocupação da terra se caracterizam pela presença de vegetação (50,5%). O Volume Médio Diário de tráfego se concentra na faixa mais baixa, de 3.318 a 4.244 veículos/dia (38,1%). Já em relação à precipitação, o menor volume de chuva, 1.559 mm a 1.708 mm, é o mais representativo nesta classe (76,7%).

5. CONCLUSÃO

Eventos climáticos extremos ocasionados pelas mudanças climáticas impactam a segurança e a qualidade da infraestrutura rodoviária. Os impactos nas rodovias variam de acordo com as vulnerabilidades características de cada via. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo propor um método de análise da vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais, tendo como estudo de caso a extensão catarinense da rodovia BR-280.

Nove critérios foram selecionados para caracterizar as condições naturais e antrópicas da BR-280/SC. O mapa de vulnerabilidade natural foi elaborado a partir das variáveis: geologia, pedologia, geomorfologia, declividade, altimetria, cobertura vegetal, hidrografia e precipitação. Por sua vez, o mapa de risco antrópico foi construído a partir dos critérios de uso e ocupação da terra e volume de tráfego diário da via. A sobreposição dos mapas de vulnerabilidade natural e risco antrópico resultaram no mapa de vulnerabilidade ambiental.

A maior parte da BR-280/SC foi classificada como alta vulnerabilidade ambiental (48%), seguida pelas classes de média (43,9%) e muito alta (8,1%). Não foram identificadas regiões de baixa e muito baixa vulnerabilidade ambiental. Constata-se que as áreas classificadas como muito alta vulnerabilidade ambiental estão concentradas, principalmente, no município de Guaramirim. Os municípios de Araquari, Jaraguá do Sul, Rio Negrinho e Mafra também apresentam locais de muita alta vulnerabilidade ambiental. Destaca-se, o alto volume de chuva, 2.174 mm a 2.350 mm, ao qual parte desta região (69,2%) está sujeita. O resultado indica que estes trechos da BR-280, em Santa Catarina, merecem a devida atenção por parte dos órgãos responsáveis pela gestão das rodovias federais, de modo a amenizar prejuízos e evitar as adversidades.

O método aplicado neste estudo se mostrou simples e efetivo, podendo ser replicado em outras rodovias devido à relevância das variáveis selecionadas para compor o modelo. O método proposto é capaz de caracterizar a área de estudo e prover informações rápidas, estratégicas e relevantes para a gestão da malha rodoviária brasileira.

No entanto, salienta-se que os resultados representam uma análise preliminar da vulnerabilidade ambiental da rodovia, baseado em dados que, por muitas vezes, estão desatualizados e são disponibilizados em escalas incompatíveis. O aprofundamento do estudo de vulnerabilidade da via requer estudos técnicos, como ensaios de caracterização física e mecânica dos solos e verificação em campo das condições atuais da cobertura vegetal ao longo da rodovia.

Ainda, estudos futuros podem aprimorar o Processo de Análise Hierárquica ao incluir um maior número de avaliadores no processo de ponderação dos critérios.

6. REFERÊNCIAS

BANERJEE, POLASH; GHOSE, MRINAL KANTI; PRADHAN, RATIKA. Analytic hierarchy process and information value method-based landslide susceptibility mapping and vehicle vulnerability assessment along a highway in Sikkim Himalaya. **Arab J Geosci** 11, 139 (2018).

BERDICA, KATJA. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. **Transport Policy**, v. 9, n. 2, 2002, p. 117-127.

BLES, Thomas; BESSEMBINDER, Janette; CHEVREUIL, Martial; DANIELSSON, Per; FALEMO, Stefan; VENMANS, Arjan. **ROADAPT: roads for today, adapted for tomorrow**. CEDR, 2015. Disponível em: https://www.cedr.eu/download/other_public_files/research_programme/call_2012/climate_change/roadapt/ROADAPT_integrating_main_guidelines.pdf. Acesso em: 4 dez. 2021.

BRASÍLIA. Antônio Luiz Coimbra De Castro. **Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres**. Brasília: 1998. Disponível em: <http://www.defesacivil.mg.gov.br/images/documentos/Defesa%20Civil/manuais/GLOSSARIO-Dicionario-Defesa-Civil.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2022.

BRASIL. Secretaria de Assuntos Estratégicos. Adaptação às Mudanças do Clima: Infraestrutura de Transporte: Produto 4: avaliação da vulnerabilidade da malha rodoviária nos hotspots. Rio de Janeiro, 2015. 71 p.

BRASIL. Portaria nº 150, de 10 de maio de 2016. Institui o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima e dá outras providências. Diário Oficial da União, 2016.

BRASIL. LEI Nº 12.608. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. 2012.

DE LEÓN, Juan Carlos Villagrán. Vulnerability: a Conceptual and Methodological Review. Studies of the University: Research, Counsel, Education – Publication Series of UNU – EHS. N. 4, 2006. Disponível em: < <http://collections.unu.edu/eserv/UNU:1871/pdf3904.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA (EPL). Ministério da Infraestrutura. **Plano Nacional de Logística 2035**. Brasília, 2021. 2016 p.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **Impacts of Climate Change on Transport: a focus on road and rail transport infrastructures**. Luxembourg: Publications Office Of The European Union, 2012.

THE INTERNATIONAL DISASTERS DATABASE (EM-DAT). **Glossary**. Disponível em: < <http://www.emdat.be/glossary>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHAW). Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework. 2012.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA (FIESC). **Análise Expedita da Situação Física da Rodovia BR-280/SC**. Florianópolis, 2016. 23 p.

GOUMRASA, Abdeldjalil; GUENDOZ, Mostefa; GUETTOUCHE, Mohamed Said; BELAROU, Abdelhakim. Flood hazard susceptibility assessment in Chiffa wadi watershed and along the first section of Algeria North–South highway using GIS and AHP method. **Applied Geomatics**, v. 13, n. 4, p. 565-585, 2 jun. 2021. Springer Science and Business Media LLC.

HSIEH, Cheng-Hsien; FENG, Cheng-Min. The highway resilience and vulnerability in Taiwan. **Transport Policy**, v. 87, p. 1-9, mar. 2020. Elsevier BV.

LI, Zhi; MENG, Xianqing; LIU, Dunwen; TANG, Yu; CHEN, Tan. Disaster Risk Evaluation of Superlong Highways Tunnel Based on the Cloud and AHP Model. **Advances In Civil Engineering**, v. 2022, p. 1-11, 13 jun. 2022. Hindawi Limited.

LIMA, L. C.; MORAIS, J. O.; SOUZA, M. J. N. Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará. Fortaleza: UNECE, 2000.

MARDANI, Abbas; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; KHALIFAH, Zainab; JUSOH, Ahmad; NOR, Khalil Md. MULTIPLE CRITERIA DECISION-MAKING TECHNIQUES IN TRANSPORTATION SYSTEMS: a systematic review of the state of the art literature. **Transport**, v. 31, n. 3, p. 359-385, 18 dez. 2015. Vilnius Gediminas Technical University.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Plano Nacional de Adaptação**. 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao>>. Acesso em: 09 nov. 2021.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO - MI. Instrução Normativa no 01, de 24 de agosto de 2012.

MUELLER, Paulo. **Norte de SC corre risco de perdas socioeconômicas por problemas na BR-280**. 2021. Disponível em: <https://ndmais.com.br/infraestrutura/norte-de-sc-corre-risco-de-perdas-socioeconomicas-por-problemas-na-br-280/>. Acesso em: 24 jan. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Contribution of Working Group 2 to the IPCC Third Assessment Report. Cambridge Univ. Press. 2001.

SAATY, Thomas L. The Analytic Hierarchy Process In Conflict Management. **International Journal of Conflict Management**, v. 1, n. 1, p. 47-68, 1 jan. 1990. Emerald.

SAATY, Thomas L; VARGAS, Luis G.. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. **International Series In Operations Research & Management Science**, 2012. Springer US.

SANTOS, Márcia Felícia Silva. Geoprocessamento aplicado ao estudo da vulnerabilidade ambiental da Serra da Calçada - MG. 2014. 45 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Geoprocessamento, Cartografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SANTOS, Andrea Souza.; RIBEIRO, Suzana Kahn. Congresso Nacional De Pesquisa Em Transporte Da ANPET, 29, 2015, Rio de Janeiro. Impactos, vulnerabilidades e adaptação no setor de transportes frente às mudanças climáticas: como a cidade do Rio de Janeiro deverá se preparar? Ouro Preto, 2015.

PANCHAL, Sandeep; SHRIVASTAVA, Amit Kr.. Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): a case study of national highway 5 in India. **Ain Shams Engineering Journal**, , v. 13, n. 3, p. 101626, maio 2022. Elsevier BV.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR). **Terminology on Disaster Risk Reduction**. Geneva: , 2009.

UNTERSTELL, Natalie. **Decisões sobre infraestrutura considerando riscos climáticos: guia prático para decisões com impacto no longo prazo no brasil**. Brasília: WWF-Brasil, 2017..

VICON SAGA. Projetos. Disponível em: <<http://www.viconsaga.com.br/site/index.php?s=projects>>. Acesso em: 25 jan. 2017.

YANG, J; SUN, H.; WANG, L. LI, L; WU, B. Vulnerability Evaluation of the Highway Transportation System against Meteorological Disasters. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 96, p.280-293, nov. 2013. Elsevier BV.

ANEXO A – DESCRIÇÃO DOS CRITÉRIOS

Critério	Descrição
Cobertura Vegetal	A cobertura vegetal de um terreno exerce importante influência sobre a parcela da água de chuva que se transforma em escoamento superficial e sobre a velocidade com que esse escoamento atinge a rede de drenagem. No processo de infiltração, as raízes modificam a estrutura do solo, provocando fissuras que, juntamente com a redução da velocidade do escoamento superficial, favorecem a infiltração. Com o desmatamento, o escoamento superficial aumenta e se dará de forma mais rápida sobre um terreno menos permeável e menos rugoso, o que intensifica o processo de erosão. Cada espécie de vegetação está associada a respectiva taxa de infiltração da água no solo. Ademais, a cobertura vegetal atual na contenção mecânica do solo, o sistema radicular das plantas une os grãos entre si e mantém a coesão do mesmo. ¹
Declividade	A declividade de um terreno exerce influência direta na velocidade de escoamento da água e na capacidade de armazenamento da água nos terrenos, uma vez que áreas com maiores declives apresentam menor capacidade de armazenamento superficial, comparado às áreas planas. Ademais, a declividade de um terreno define o grau de repouso, ou seja, o ângulo mais íngreme de um material granular solto em relação ao plano horizontal que se forma sem ocorrer deslizamento. Este ângulo varia de acordo com a morfologia do material do terreno; partículas esféricas e arredondadas tendem a suportar um ângulo bastante baixo, enquanto partículas irregulares e angulares podem ser empilhadas de forma íngreme sem torna-se instável. ²
Geologia	A formação geológica exerce influência direta nos movimentos de massa. Em eventos de precipitação intensa, o solo absorve uma parcela da água, enquanto a outra parte escoar em forma de enxurrada na superfície do terreno. A parcela da água que se infiltra no solo se confronta com variados tipos de rocha. No entanto, quando estas rochas são impermeáveis, a água não encontra passagem no solo e se acumula em um único local. Desta forma, o solo saturado de umidade pode vir a se romper, desencadeando os movimentos de massa nas encostas até base dos morros, ou, no caso do presente estudo, até a rodovia. ²
Hidrografia	Áreas próximas aos corpos d'água estão mais sujeitas às inundações, devido ao transbordamento das massas d'água no período de precipitações intensas.
Hipsometria	A altitude de um terreno está intimamente relacionada à possibilidade da ocorrência de inundações no mesmo. De modo geral, quanto maior a altitude, menor a probabilidade de inundação para uma determinada região devido à ação da Lei da Gravidade, a qual direciona o escoamento para as regiões mais baixas. Desse modo, as regiões mais baixas de uma determinada área apresentam uma tendência maior a sofrer com inundações. ³
Pedologia	Da água que atinge a superfície do solo, parte é removida nas depressões do terreno, parte se infiltra e o restante escoar pela superfície do terreno. O escoamento da água que atinge a superfície do terreno tem início após a intensidade de precipitação superar a capacidade de infiltração do solo e depois de serem preenchidas as depressões armazenadoras da superfície. A textura e a estrutura de um solo, como sua constituição, granulometria, nível de coesão e estado de compactação; refletem diretamente na taxa de infiltração da água. Solos arenosos propiciam maior infiltração e percolação, e reduzem o escoamento superficial, por outro lado, os solos siltsos ou argilosos, bem como os solos compactados superficialmente, produzem maior escoamento superficial. ⁴
Pluviometria	A precipitação exerce influência direta nos movimentos de massa, uma vez que esta tende a interferir nas condições de estabilidade de encostas ao aumentar os teores de água dos terrenos, reduzindo sua resistência. Os limites de precipitação causadores de deslizamentos variam de acordo com cada região, devido a fatores como: geologia, topografia, intensidade pluviométrica, ocupação e interferência antrópica, dentre outros. Ademais, a precipitação intensa contribui para as inundações, principalmente em áreas urbanizadas, nas quais a taxa de infiltração da água tende a ser pequena. ⁵
Uso e ocupação da terra	Os diferentes usos e ocupações do solo alteram as características de permeabilidade de um terreno, sendo fatores preponderantes no processo de infiltração e escoamento da água. Em áreas urbanizadas, nas quais a cobertura do terreno é alterada, tem-se um aumento do volume de escoamento superficial e da vazão de pico. Ainda, o uso e a ocupação inadequados do solo podem gerar instabilidades nas encostas.

Volume Médio Diário	O Volume Médio Diário (VMD) é utilizado para avaliar a distribuição de tráfego, medir a demanda de uma via, entre outros. Uma vez que o VMD está associado à pressão antrópica sobre a rodovia, ponderou-se que o mesmo deve ser considerado um indicador para a vulnerabilidade. A construção de rodovias em locais inadequados também contribui para a ocorrência de deslizamentos, pois as vibrações provocadas pelo tráfego intenso geram instabilidade nas encostas. ⁶
---------------------	--

¹. BARBOSA JÚNIOR, A. R. Elementos de hidrologia aplicada. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Ouro Preto, 2014. 241 p.

². MONTGOMERY, C.W. Environmental geology. 3a ed. Dubuque: WM.C. Brown Publishers, 1992. 465p.

³. MAGALHÃES, I. A. L; THIAGO, C. R. L; AGRIZZI, D. V; SANTOS, A. R. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: uma análise comparativa entre dois métodos. Cadernos de Geociência, v. 8, n. 2, 2011, p. 63-70.

⁴. COELHO NETTO, Ana L. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: Guerra, Antônio J.T.; Cunha, Sandra B. da. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.

⁵. TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M., 1987. Escorregamentos – Serra do Mar, Municípios de Cubatão. Anais do 5o congresso brasileiro de geologia e engenharia. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A. – IPT, 23 p.

⁶. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRURA DE TRANSPORTES - DNIT. Estimativa do Volume Médio Diário anual - VMD - 2009. 2009.

‘

ANEXO B – DETALHAMENTO DA METODOLOGIA DE ELABORAÇÃO DOS MAPAS

B1) Mapa de cobertura vegetal

O mapa de cobertura vegetal foi elaborado com base nas diferentes classes de vegetação que ocorrem na área de estudo. Foram utilizados os dados das regiões fitoecológicas de Santa Catarina, que foram gerados pelo Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina (IFFSC, 2016)¹, a partir da digitalização do mapa original elaborado por Klein (1978)².

Os pesos relacionados às classes foram atribuídos de acordo com a densidade de árvores referente a cada unidade de vegetação, dado que uma cobertura vegetal densa promove maior infiltração da água, retira a umidade do solo através da evapotranspiração, assim como previne a compactação do solo. A vegetação litorânea, como exceção, recebeu o menor peso, uma vez que a areia, solo característico dessa cobertura, faz com que a infiltração da água seja praticamente total e instantânea.

B2) Mapa de declividades

A declividade é a medida do grau de inclinação de um terreno em relação a um plano horizontal, podendo ser expressa em porcentagem ou em graus. O mapa elaborado consiste na representação das diferentes declividades encontradas na área de estudo. O mesmo foi obtido através da extração das declividades a partir do raster gerado do MDT, por meio da função *slope*. Dessa forma, as diferentes declividades foram classificadas de acordo com a divisão elaborada pela EMBRAPA (1979)³, apresentada a seguir (Tabela 1)

Tabela 1 - Classificação da declividade de um terreno

Declividade (%)	Relevo
0 a 3	Plano
3,1 a 8	Suavemente ondulado
8,1 a 20	Ondulado
20,1 a 45	Fortemente ondulado
45,1 a 75	Montanhoso
> 75	Fortemente montanhoso

Fonte: EMBRAPA (1979).

B3) Mapa geológico

O mapa geológico foi elaborado com base nas diferentes classes de rochas que ocorrem na área de estudo, a partir de dados disponibilizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), do ano de 1986.

B4) Mapa hidrológico

O mapa hidrológico foi elaborado a partir dos dados disponibilizados pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS), referente ao ano de 2011. Optou-se por não

dividir o critério hidrologia em subcategorias, uma vez que a apenas o quantitativo dos rios foi suficiente para o desenvolvimento do presente estudo.

B5) Mapa hipsométrico

O mapa hipsométrico consiste na interpretação gráfica do relevo de uma região e representa o estudo da variação da elevação dos terrenos que compõem tal região, tendo como referência o nível médio do mar. A elaboração do mapa se procedeu a partir da rasterização do MDT, resolução espacial de 30 metros e datado do ano 2.000, disponibilizado pela Epagri. Na sequência, realizou-se a reclassificação das alturas, na qual as classes altimétricas foram separadas em intervalos de 100 metros, totalizando 10 classes.

B6) Mapa pedológico

O mapa pedológico foi elaborado com base nas diferentes classes de solo que ocorrem na área de estudo. Foram utilizados os dados disponibilizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), do ano de 2004.

B7) Mapa de pluviometria

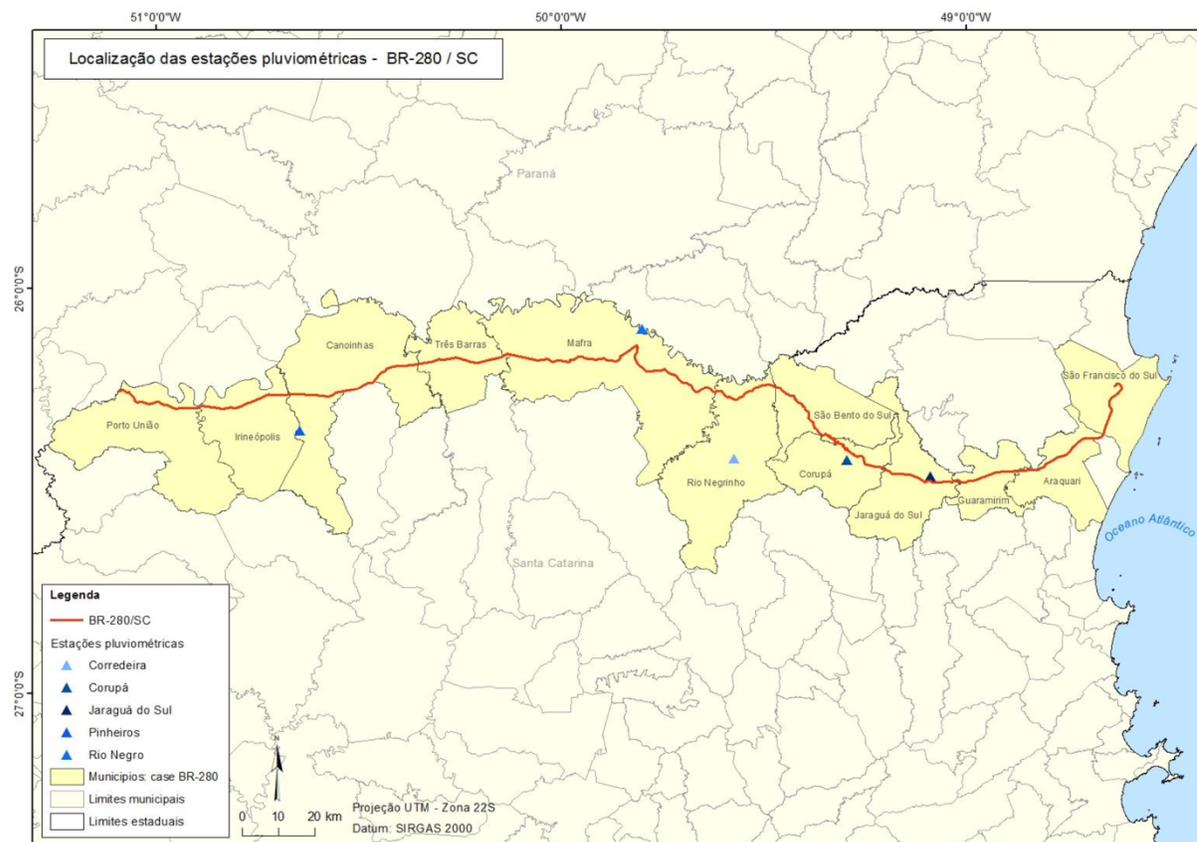
As informações pluviométricas foram disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2016)⁴. Foram utilizados os históricos de precipitação das estações pluviométricas localizadas próximas à rodovia BR-280/SC e que possuíam dados consistentes para o período de 2005 a 2014. Salienta-se que foi estabelecido o uso de apenas 10 anos de dados pluviométricos devido às alterações nos regimes de chuva. Desta forma, as médias pluviométricas são mais representativas quanto ao real volume de chuvas ao qual a rodovia está sujeita, atualmente.

A Figura 1 apresenta a distribuição das cinco estações pluviométricas ao longo da rodovia, sendo estas:

- a) Estação pluviométrica CORREDEIRA: localizada no município de Rio Negrinho (SC), código 02649055, Latitude: 26°25'10" S, Longitude: 49°34'23" W, operada pela Águas Paraná, com média pluviométrica anual de 1458,7 mm e distante aproximadamente 16,3 km da rodovia;
- b) Estação pluviométrica CORUPÁ: localizada no município de Corupá (SC), código 02649013, Latitude: 26°25'26" S, Longitude: 49°17'33" W, operada pela EPAGRI, com média pluviométrica anual de 1913,3 mm e distante aproximadamente 1,9 km da rodovia;
- c) Estação pluviométrica JARAGUÁ DO SUL: localizada no município de Jaraguá do Sul (SC), código 02649037, Latitude: 26°27'51" S, Longitude: 49°5'12" W, operada pela EPAGRI, com média pluviométrica anual de 2349,6 mm e distante aproximadamente 1,4 km da rodovia;
- d) Estação pluviométrica PINHEIROS: localizada no município de Canoinhas (SC), código 02650018, Latitude: 26°21'55" S, Longitude: 50°38'44" W, operada pela Águas Paraná, com média pluviométrica anual de 1661,7 mm e distante aproximadamente 9,7 km da rodovia;
- e) Estação pluviométrica RIO NEGRO: localizada no município de Rio Negro (SC), código 026549021, Latitude: 26°6'0" S, Longitude: 49°48'0" W, operada pela Águas Paraná, com média pluviométrica anual de 1592,1 mm e distante aproximadamente 4,4 km da rodovia.

A partir das médias pluviométricas supracitadas foi elaborado o mapa de índices de chuva ao longo da rodovia BR-280/SC. A precipitação média anual para o local de estudo foi estimada através da ferramenta de interpolação IDW (*Inverse Distance Weighting*, em português Inverso da Distância Ponderada). A técnica de interpolação IDW consiste na combinação linear ponderada dos pontos de amostragem, ou seja, a média é ponderada entre o ponto base e o seu vizinho, de forma que a influência causada pelos vizinhos diminui na medida em que a distância aumenta. O IDW é um método simples e clássico, sendo recomendado para regiões com alta densidade de amostras (DEUS et al., 2010)⁵. Desta forma, tal procedimento foi considerado adequado para o presente estudo.

Figura 1 - Distribuição das estações pluviométricas ao longo da BR-280, em Santa Catarina



B8) Mapa de uso e ocupação da terra

Para a elaboração do mapa de uso e ocupação da terra, foi realizada a interpretação supervisionada da imagem de satélite, adquirida através do software *Google Earth Pro*, datada de 13 de dezembro de 2015. Tal classificação é realizada por meio do reconhecimento de padrões e objetos homogêneos, baseada no conhecimento do analista da área de estudo mapeada. A etapa de pré-processamento da imagem de satélite é dada pelo georreferenciamento desta imagem. O georreferenciamento consiste na inserção de pontos de controle na imagem com coordenadas conhecidas e na execução de uma transformação polinomial das coordenadas. Para realizar a correção da posição da imagem, utilizou-se como pontos de controle objetos específicos

identificados na imagem de satélite. Os pontos foram distribuídos de modo homogêneo pela imagem, com intuito de garantir o menor erro possível na correção geométrica.

Foram consideradas as principais classes de uso e ocupação da terra, que exercem influência direta na vulnerabilidade da via, de acordo com parâmetros como: o conhecimento do local de estudo; a diferenciação evidente entre as feições e a otimização de tempo com um número reduzido de feições a serem classificadas, devido à extensão abrangente da via. As classes foram agrupadas nas seguintes categorias temáticas:

- a) Vegetação: o termo vegetação se refere ao conjunto da cobertura vegetal própria de um determinado local, composto por plantas de diferentes características. Todas as classes de cobertura vegetal identificadas na área de estudo estão incluídas nesta categoria;
- b) Massas d'água: entende-se por massas d'água, também denominados corpos d'água, qualquer concentração relevante de água, podendo ser natural ou artificial, tais como: lagoas, rios, córregos e canais. Salienta-se que, no presente estudo, só foram consideradas as massas d'água mais abundantes, uma vez que a cor dos pixels dos rios identificados ao longo da rodovia BR-280/SC tende a propiciar erros durante a reclassificação, sendo indevidamente reconhecidos como solo exposto;
- c) Agricultura e solo exposto: o conceito de solo exposto foi atribuído às áreas em que o solo está em processo de erosão e/ou sem cobertura vegetal. Condição semelhante é verificada nos terrenos em que predomina a agricultura. Neste estudo, optou-se por associar agricultura e solo exposto em somente uma categoria, pois as feições apresentadas na imagem de satélite, assim como as cores dos pixels, apresentam-se similares. Sendo assim, a associação ocorreu para que fossem evitados erros de classificação;
- d) Área urbana: a área urbana é caracterizada por construções, arruamentos e intensa ocupação urbana.

Após a elaboração do mapa, utilizou-se a ferramenta do ArcGIS “*Export to KML*”, a qual converte os arquivos no formato *shapefile* (.shp) para o sistema do Google Earth (.KML). A partir deste procedimento, foi possível visualizar as classes definidas no mapa sobrepostas às imagens de satélite disponibilizadas através do software. Desse modo, ocorreu a validação da consistência da classificação desenvolvida.

B9) Mapa de Volume Médio Diário (MVD)

O mapa de Volume Médio Diário foi elaborado com base nas classes de volume de tráfego que ocorrem em diferentes trechos da rodovia BR-280, em Santa Catarina. Foram utilizados os dados disponibilizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, referente ao ano de 2009 (DNIT, 2009)⁶. O tráfego intenso de veículos sobrecarrega a infraestrutura rodoviária. Desta forma, os pesos foram atribuídos em ordem crescente de acordo com o volume de tráfego.

- ¹. INVENTÁRIO FLORÍSTICO FLORESTAL DE SANTA CATARINA - IFFSC. Mapas IFFSC - Meta 2 - Inventário (FURB). Disponível em: <http://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1172&Itemid=543>. Acesso em: 14 jan 2022.
- ². KLEIN, R. M. Mata fitogeográfico do Estado de Santa Catarina. Itajaí: Herbáreo Barbosa Rodrigues, 1978. 24p.
- ³. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: Reunião Técnica de Levantamento de Solos, 1979, Rio de Janeiro. Súmula... Rio de Janeiro, 1979. 83 p.
- ⁴. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Séries Históricas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=1080&TipoReg=7&MostraCon=false&CriaArq=false&TipoArq=1&SerieHist=true>>. Acesso em: 09 ago. 2021.
- ⁵. DEUS, B. V.; ZEILHOFER, P.; ARAUJO, G. C.; SANTOS, A. S. L. Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, III, 2010, Recife. Interpolação pluviométrica na bacia do alto e médio rio Teles Pires: uma análise de séries históricas e interpoladores. Cuiabá, 2010.
- ⁶. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRURA DE TRANSPORTES - DNIT. Estimativa do Volume Médio Diário anual - VMD - 2009. 2009.

ANEXO C – MAPAS DE CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

C1) Mapa de cobertura vegetal

Para a variável cobertura vegetal, duas classes foram predominantes: floresta ombrófila mista e floresta ombrófila densa, abrangendo 58,5% e 32,9% da área total, respectivamente. A floresta nebulosa foi a classe menos representativa, compondo apenas 0,1% do total, conforme apresentado na Figura 2. A distribuição da vegetação ao longo da rodovia BR-280, em Santa Catarina, é apresentada na Figura 3.

Figura 2 - Classes de cobertura vegetal na BR-280/SC

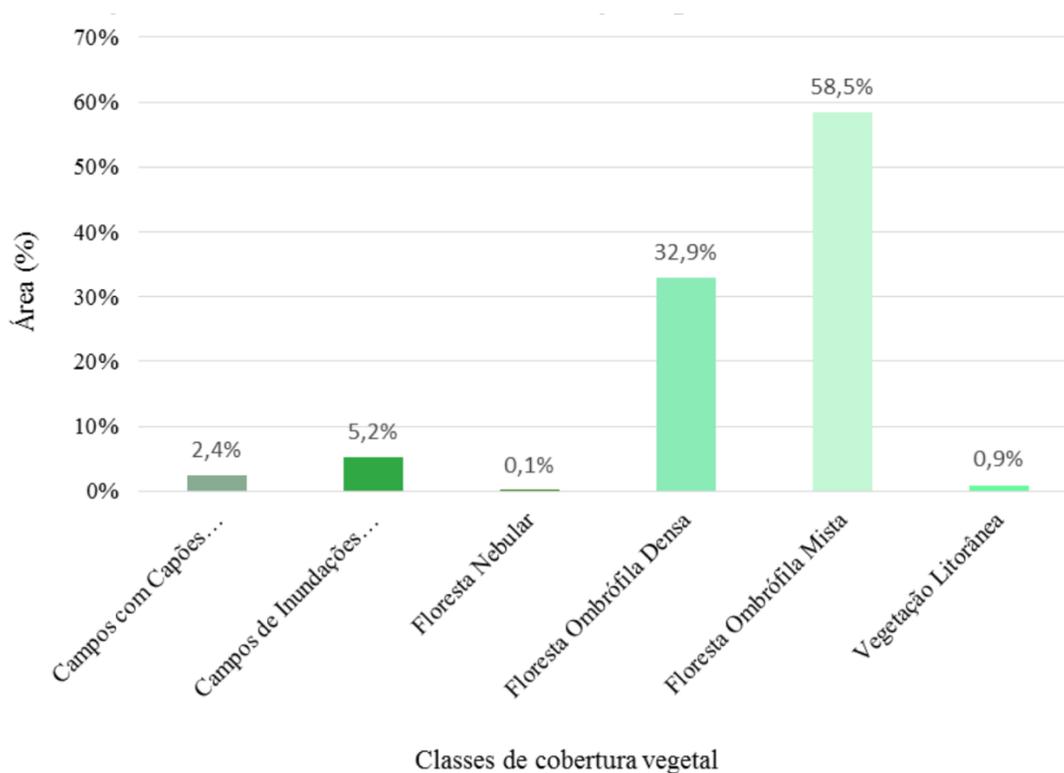
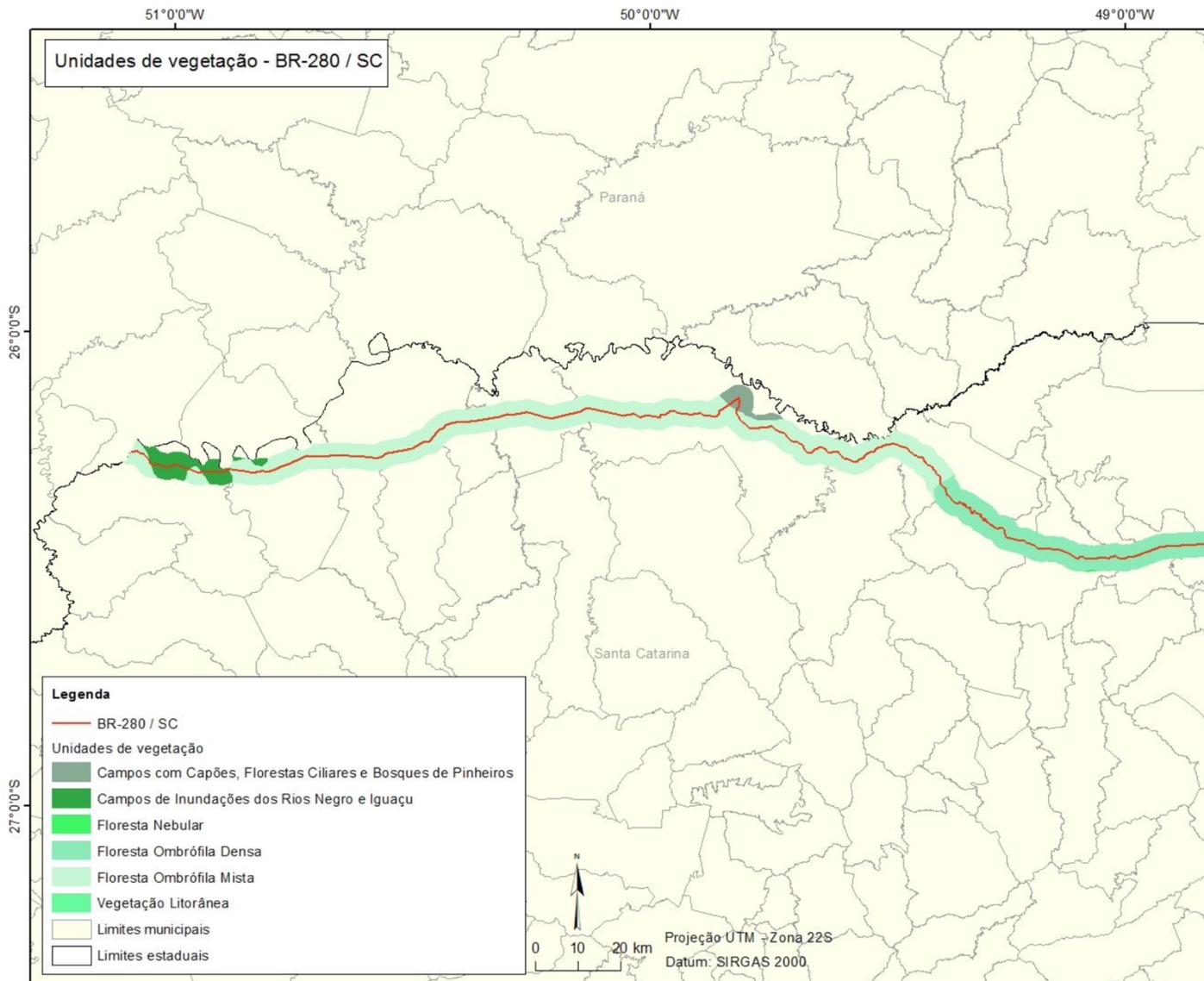


Figura 3 - Cobertura vegetal da BR-280, em Santa Catarina



C2) Mapa de declividades

A Figura 4 apresenta a predominância do relevo plano, classe que abrange 88,1% do total da área de estudo. As áreas de relevo suavemente ondulado totalizam 8,2% do total. Já as classes de relevo ondulado e relevo fortemente ondulado totalizam 3,1% e 0,6% em área, respectivamente. Estas estão concentradas, principalmente, nos municípios de Jaraguá do Sul, Corupá e São Bento do Sul. Para a área de estudo não foram identificadas as classes de relevo montanhoso e relevo fortemente montanhoso, ou seja, aquelas em que a declividade do terreno é superior a 45%. Figura 5 apresenta o mapa de declividade da área de estudo com a devida distribuição das classes.

Figura 4 - Classes de declividade do relevo na BR-280/SC

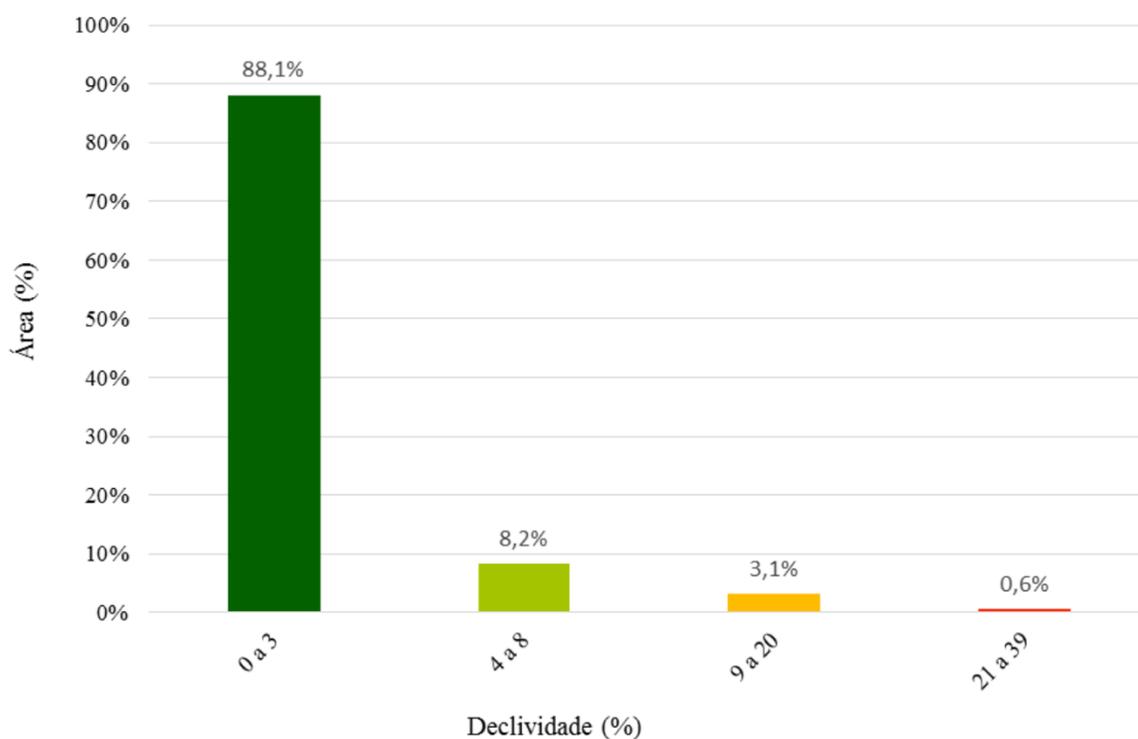
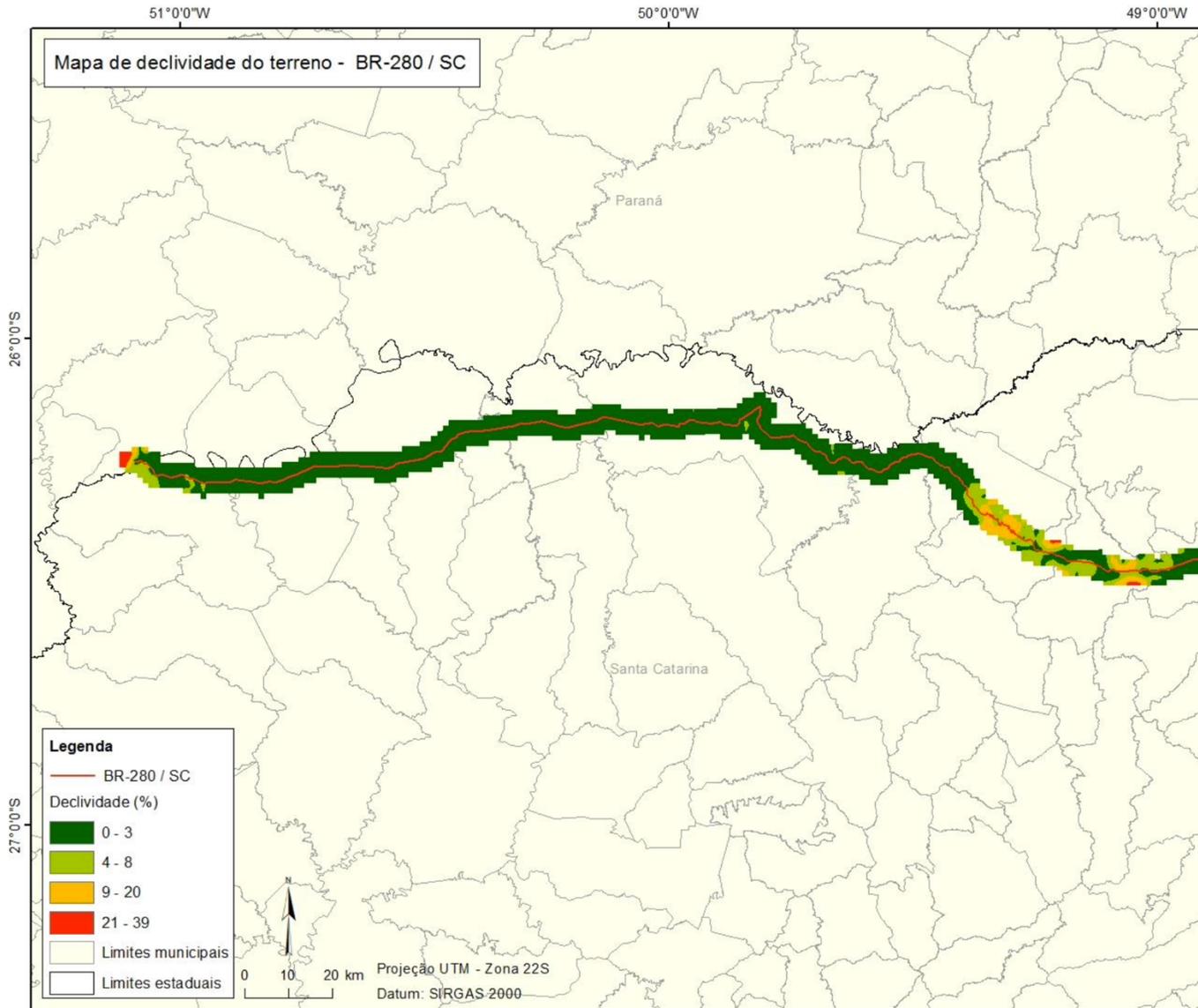


Figura 5 - Declividade da BR-280, em Santa Catarina



C3) Mapa geológico

A Figura 6 exibe as classes geológicas presentes ao longo da rodovia BR-280, em Santa Catarina. Destacam-se as quatro classes mais representativas com suas respectivas porcentagens da área total: Campo Mourão (18,7%), Depósitos Aluvionares (17,6%), Rio do Rasto (16%) e Complexo Granulítico Santa Catarina (15,1%). A distribuição geológica da área de estudo é apresentada na Figura 7.

Figura 6 - Classes geológicas na BR-280/SC

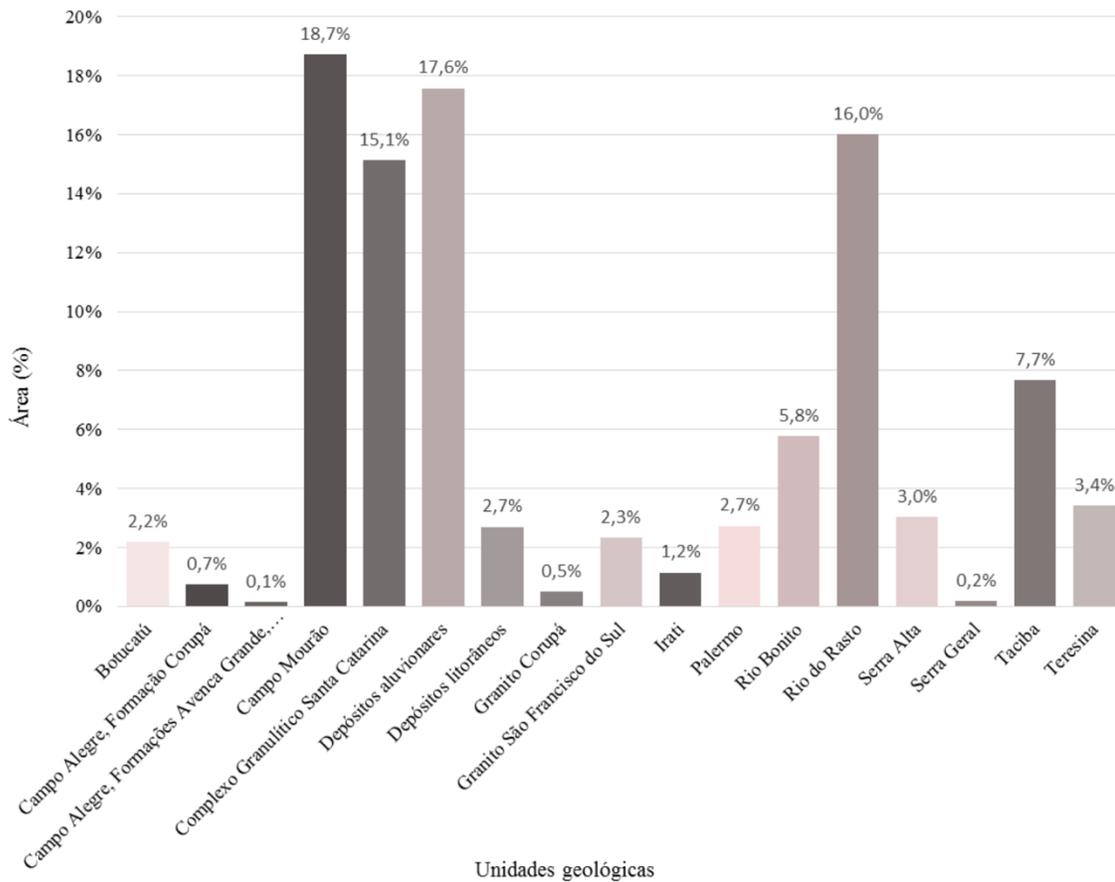
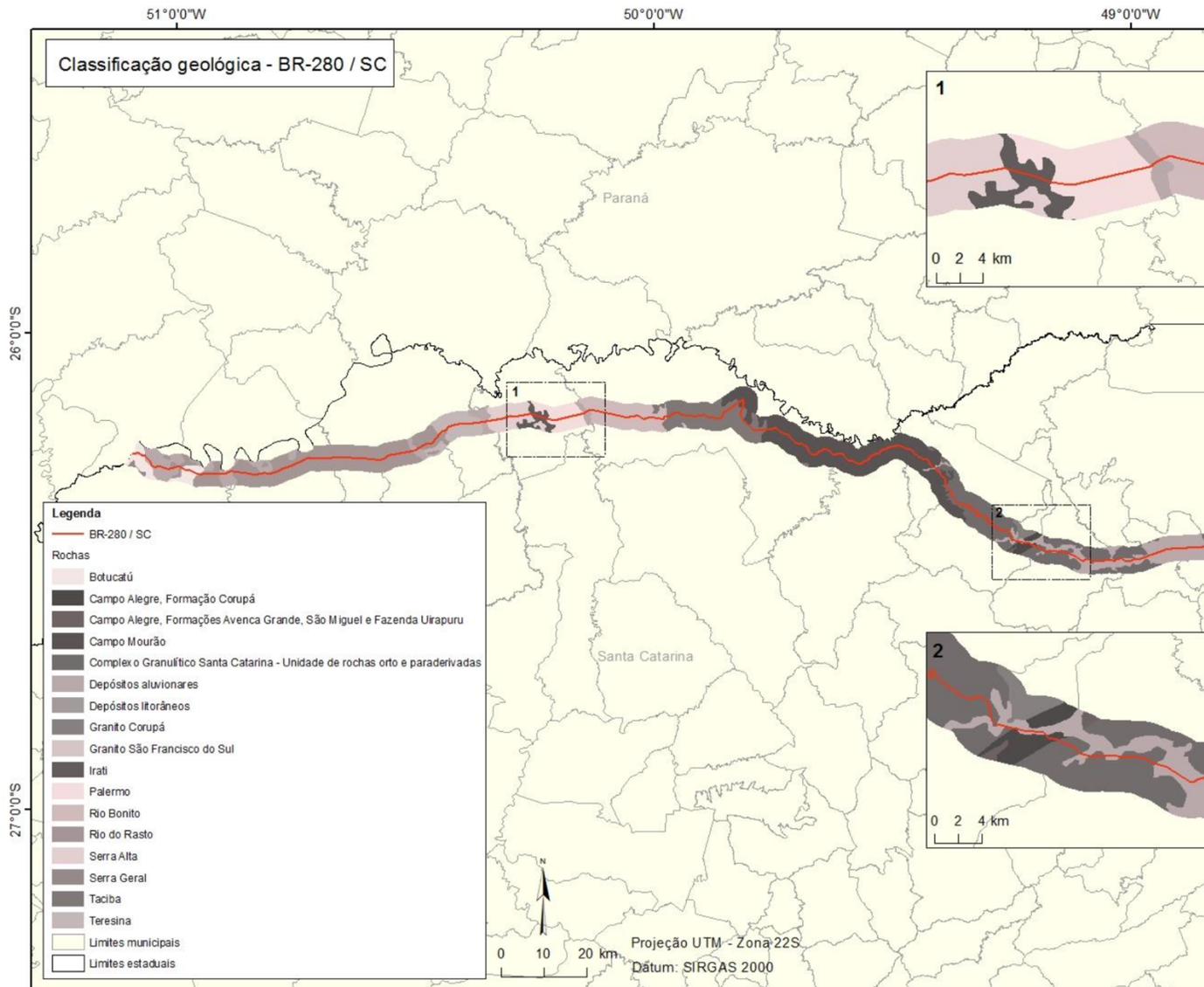


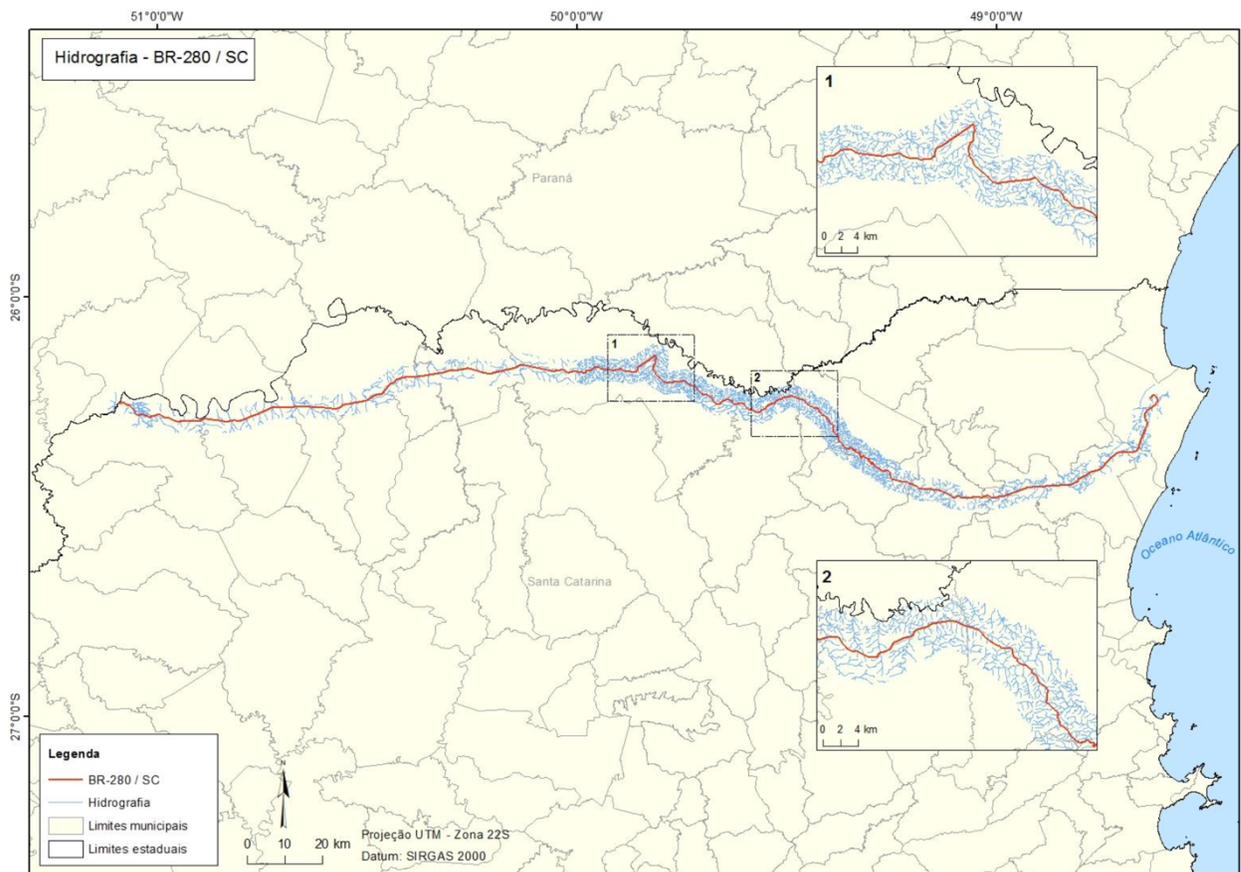
Figura 7 - Geologia da BR-280, em Santa Catarina



C4) Mapa hidrológico

Para a variável hidrografia não foi realizada a divisão em classes. No entanto, a partir da distribuição apresentada na Figura 8, percebe-se que as maiores densidades hidrográficas estão localizadas entre as regiões 1 e 2 do mapa, ou seja, compreendendo os municípios de Corupá, São Bento do Sul, Rio Negrinho e Mafra.

Figura 8 - Hidrografia da BR-280, em Santa Catarina



C5) Mapa hipsométrico

Na área de estudo, predominam altitudes entre 700 e 900 m (Figura 9). A Figura 10 apresenta o mapa hipsométrico da BR-280, em Santa Catarina.

Figura 9 - Hipsometria da BR-280/SC

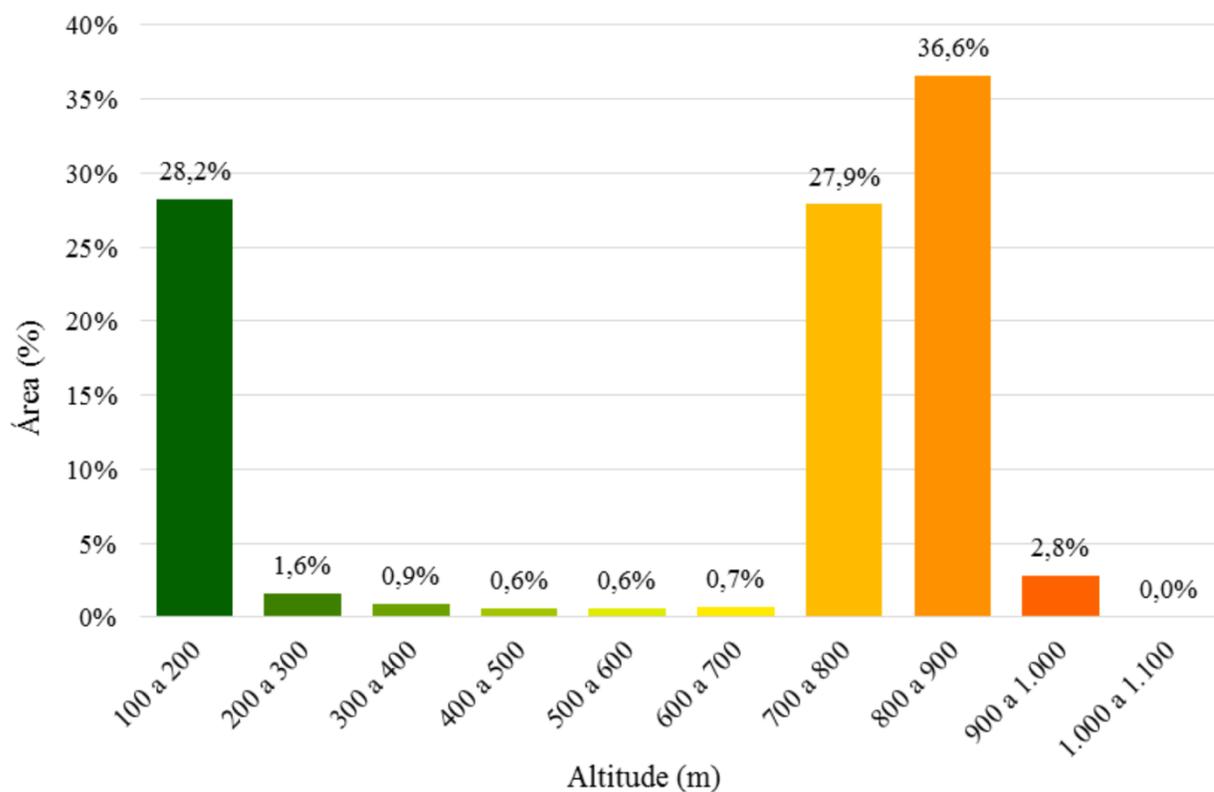
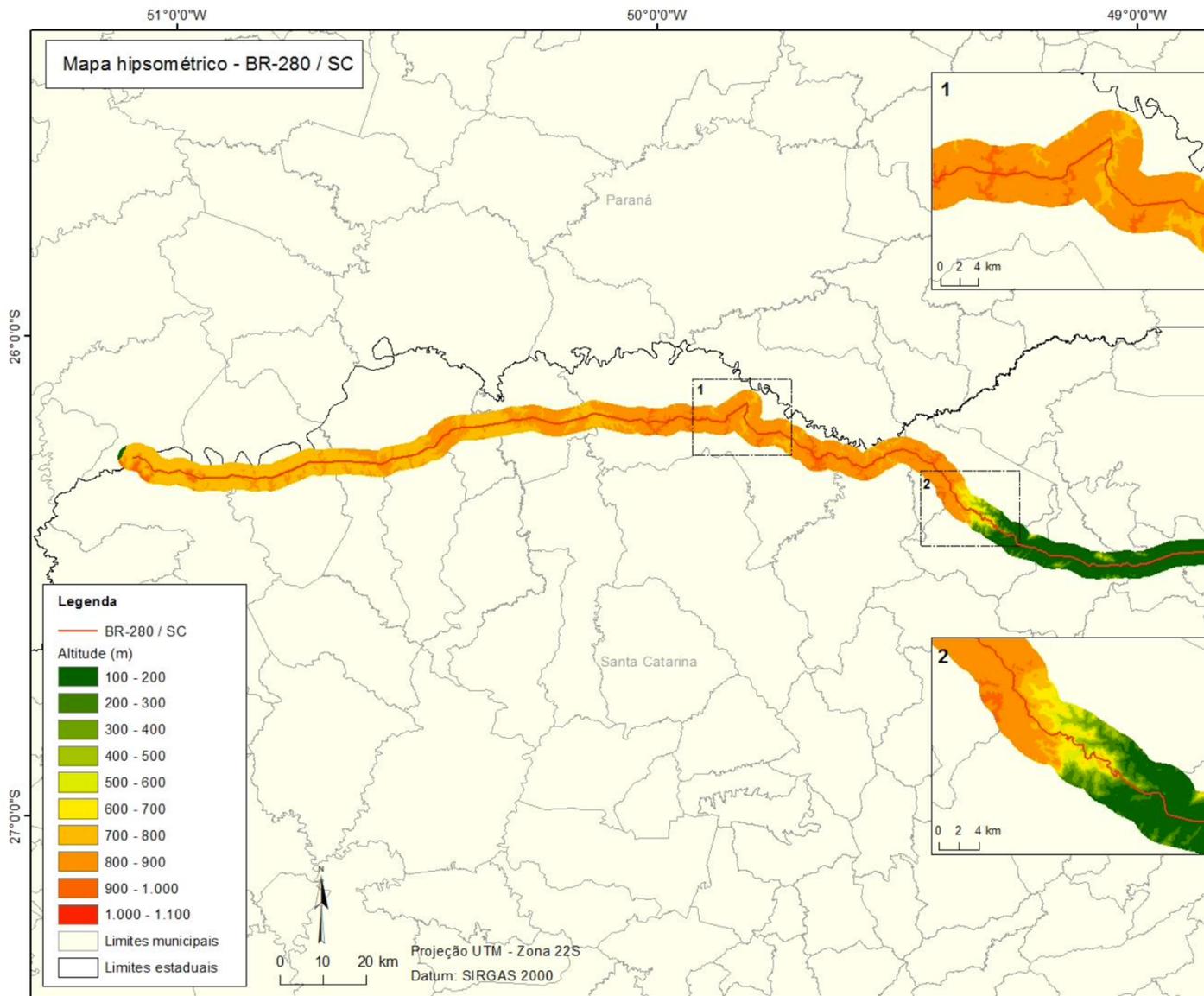


Figura 10 - Hipsometria da BR-280, em Santa Catarina



C6) Mapa pedológico

Para a variável pedologia, a classe de associação dos solos cambissolo e podzólico vermelho-amarelo predomina, abrangendo aproximadamente 59% da área total, seguido pelo latossolo bruno/vermelho (16,9%), Glei (15,9%) e areias quartzosas marinhas (3,9%), conforme apresentado na Figura 11. As demais classes foram pouco representativas. O mapa pedológico da BR-280, em Santa Catarina, é representado na Figura 12.

Figura 11 - Classificação pedológica da BR-280/SC

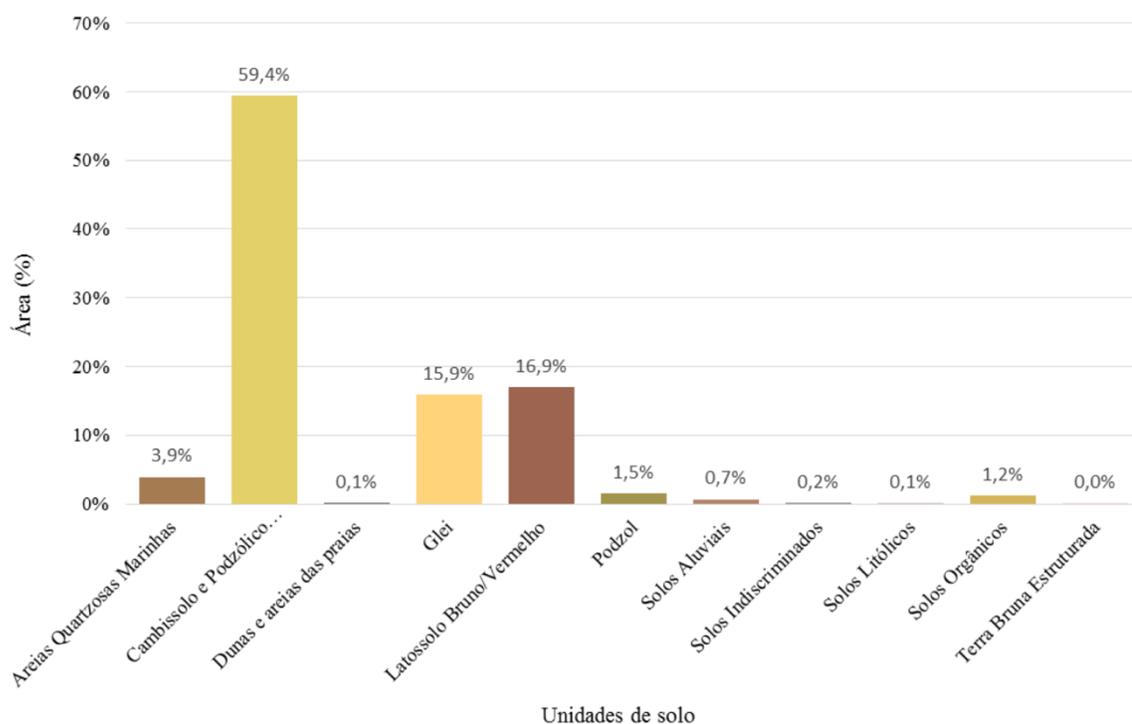
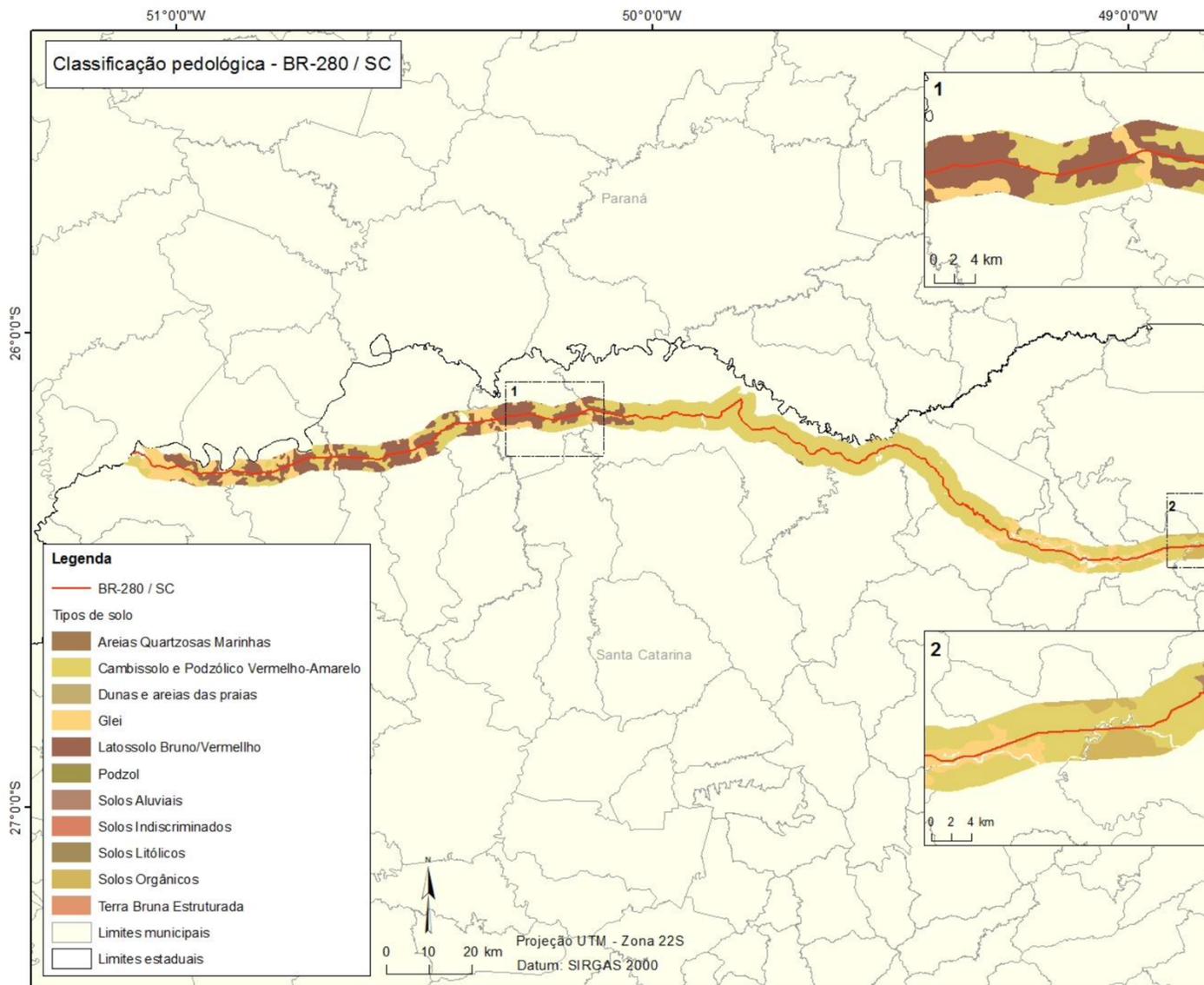


Figura 12 - Pedologia da BR-280, em Santa Catarina



C7) Mapa de pluviometria

A Figura 13 exibe as classificações das médias pluviométricas anuais, em mm, verificadas ao longo da rodovia BR-280, em Santa Catarina, entre os anos de 2005 e 2014. Com a maior representatividade, a classe de 1.559 mm a 1.708 mm abrange 61,3% da área de estudo. Já as classes de maiores médias anuais, 2.174 mm a 2.350 mm e 1.994 mm a 2.173 mm compreendem, respectivamente, 10,6% e 16,2% do total, sendo verificadas nos municípios de São Francisco do Sul, Araquari, Guaramirim, Jaraguá do Sul e em parte de Corupá. O mapa da distribuição pluviométrica é apresentado na Figura 14.

Figura 13 - Classificação pluviométrica da BR-280/SC

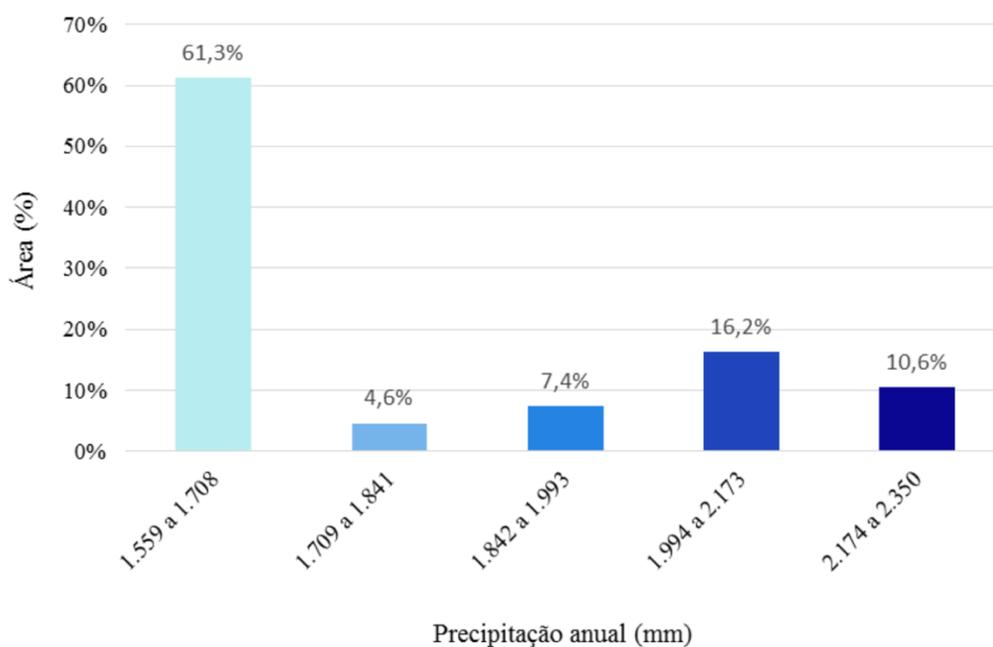
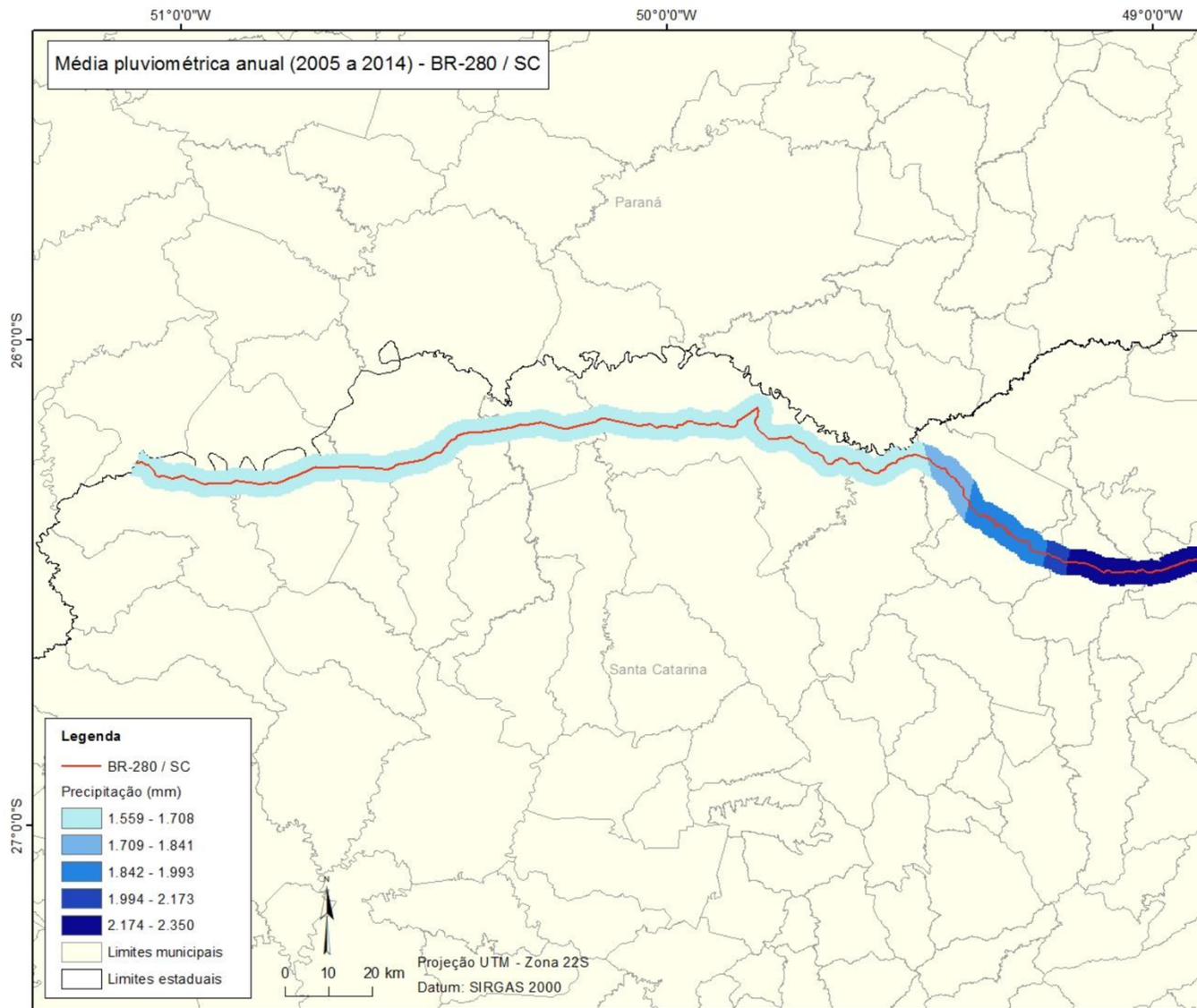


Figura 14 - Pluviometria da BR-280, em Santa Catarina



C8) Mapa de uso e ocupação da terra

Para a variável uso e ocupação da terra, conforme apresentado na Figura 15, a classe com maior representatividade é a associação de solo exposto e agricultura, com aproximadamente 47% da área total de estudo, seguida pela classe vegetação (43,5%). Ambas estão localizadas ao longo de toda a rodovia BR-280, em Santa Catarina. Já as áreas urbanizadas (5,7%) estão concentradas em grandes centros próximos à rodovia, caso de Jaraguá do Sul e Mafra, conforme exibido na Figura 16.

Figura 15 - Classificação de uso e ocupação da terra da BR-280/SC

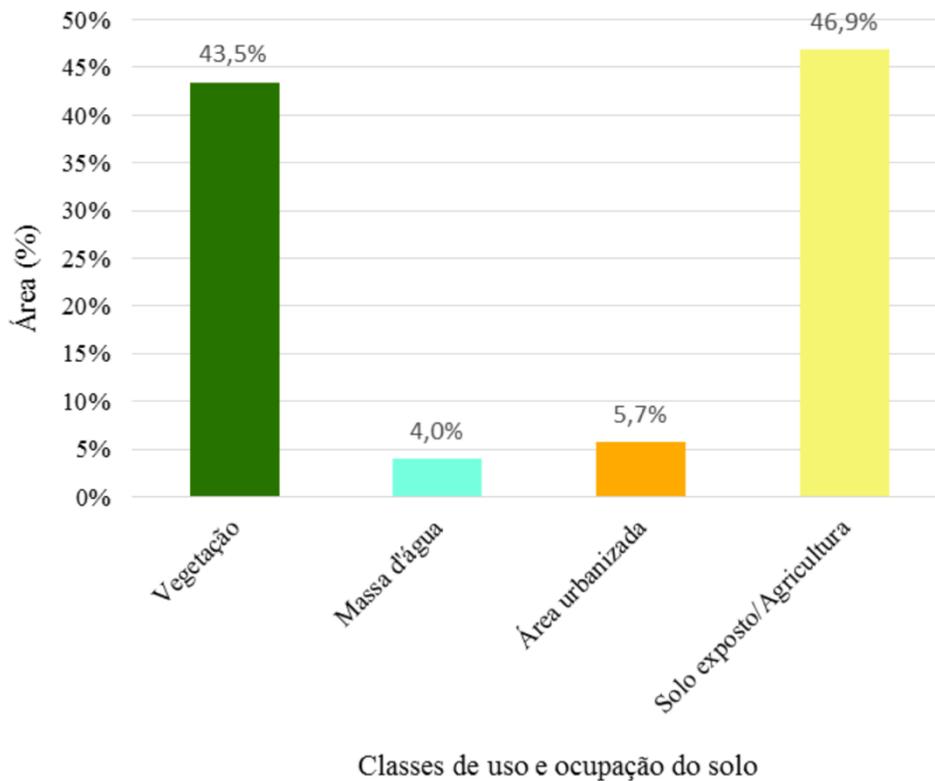
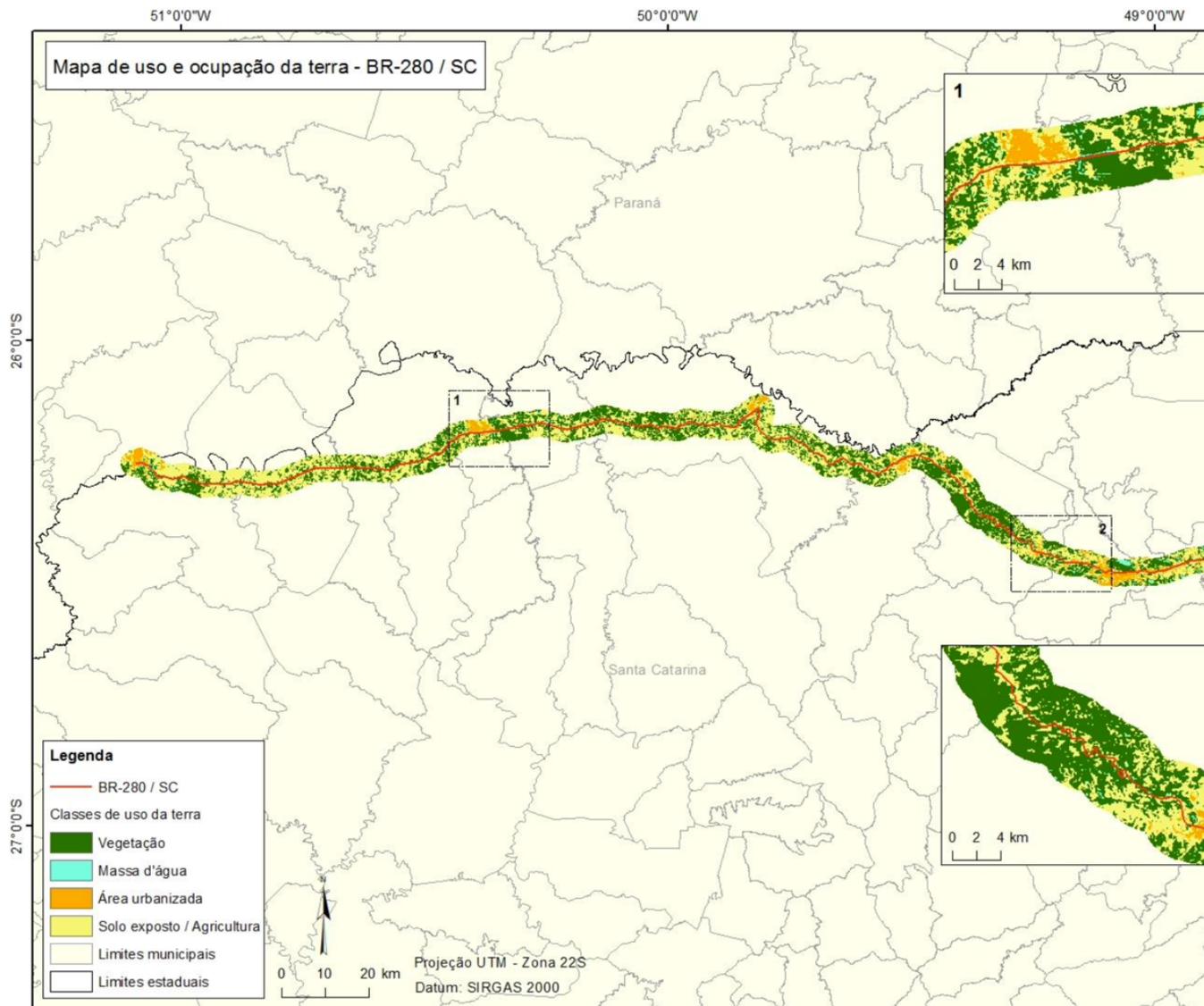


Figura 16 - Uso e ocupação da terra na BR-280, em Santa Catarina



C9) Mapa de Volume Médio Diário (MVD)

A Figura 17 apresenta as classes de Volume Médio Diário de tráfego verificadas ao longo da rodovia BR-280, em Santa Catarina. O tráfego menos intenso, 3.318 a 4.244 veículos por dia, é o mais representativo, abrangendo 34,8% da extensão total da rodovia. Na sequência, estão as classes 5.190 a 6.080 e 9.080 a 10.860, ambas com 21,7% do total. O tráfego mais intenso, 21.750 veículos por dia, é verificado em 8,7% da extensão da via, ou seja, um trecho de aproximadamente 20 quilômetros, entre os municípios de Araquari e Guaramirim. A distribuição do volume de tráfego na BR-280/SC é apresentada na Figura 18.

Figura 17 - Classificação do volume médio de tráfego da BR-280/SC

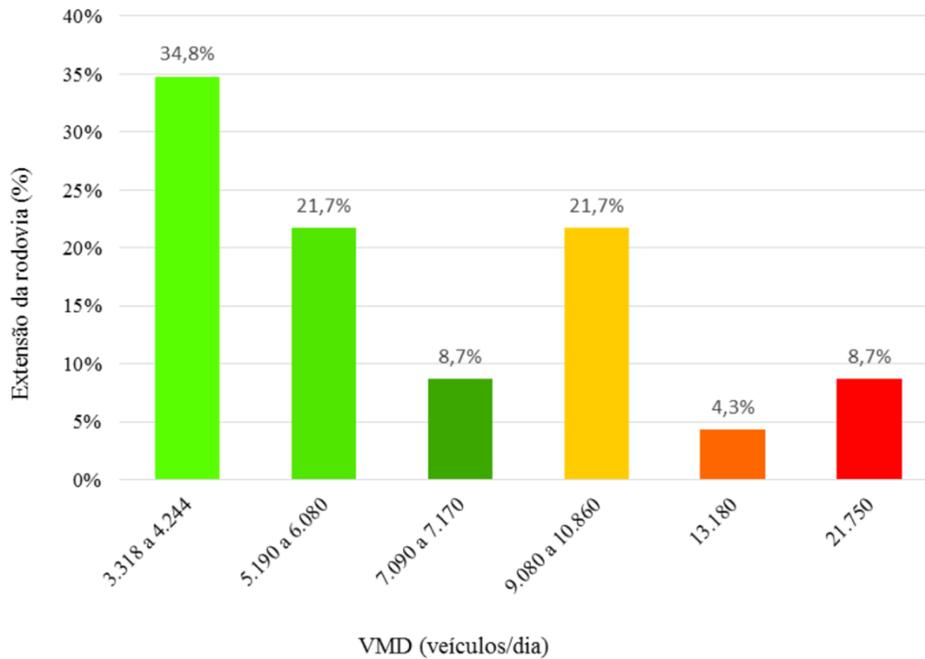
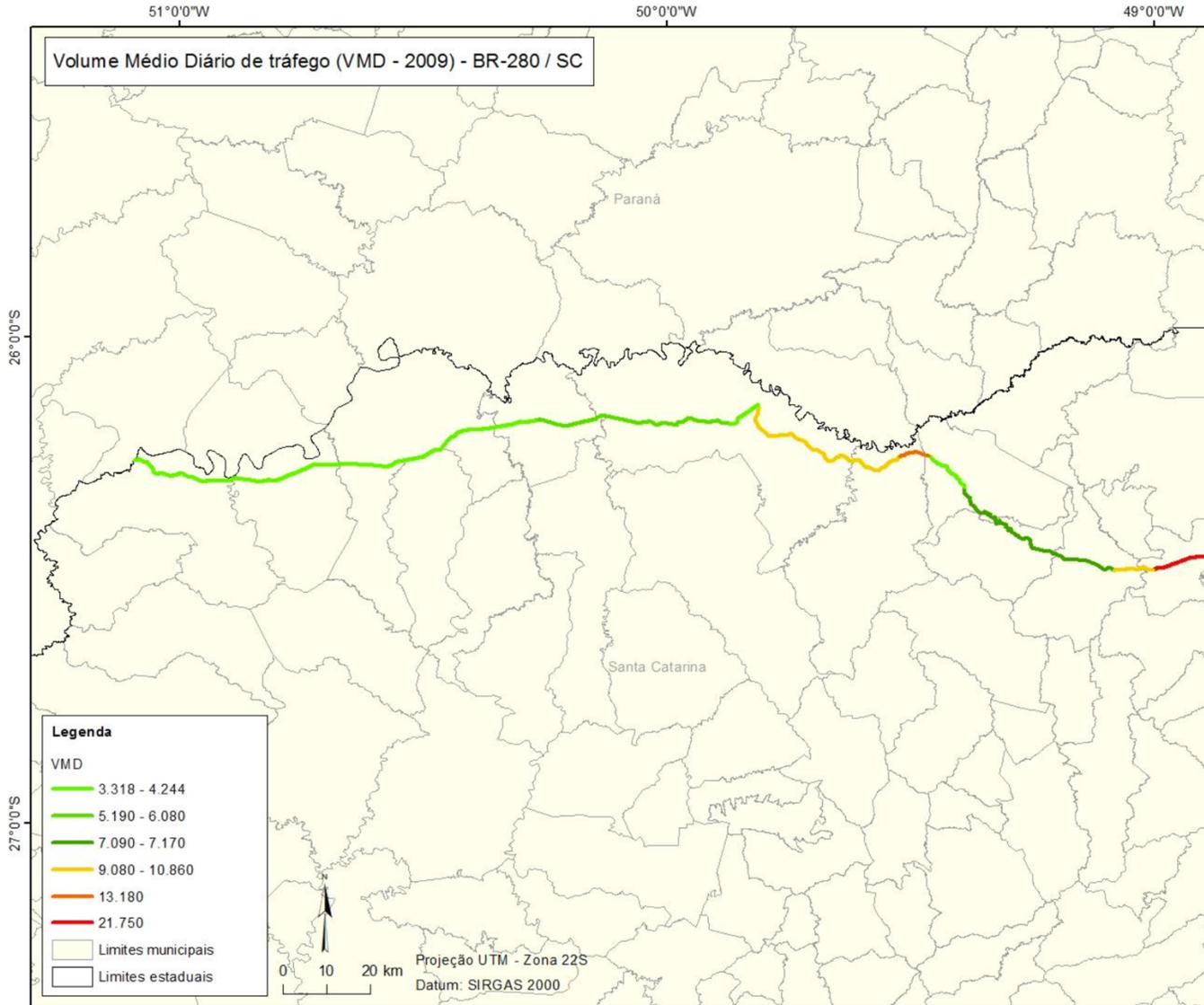
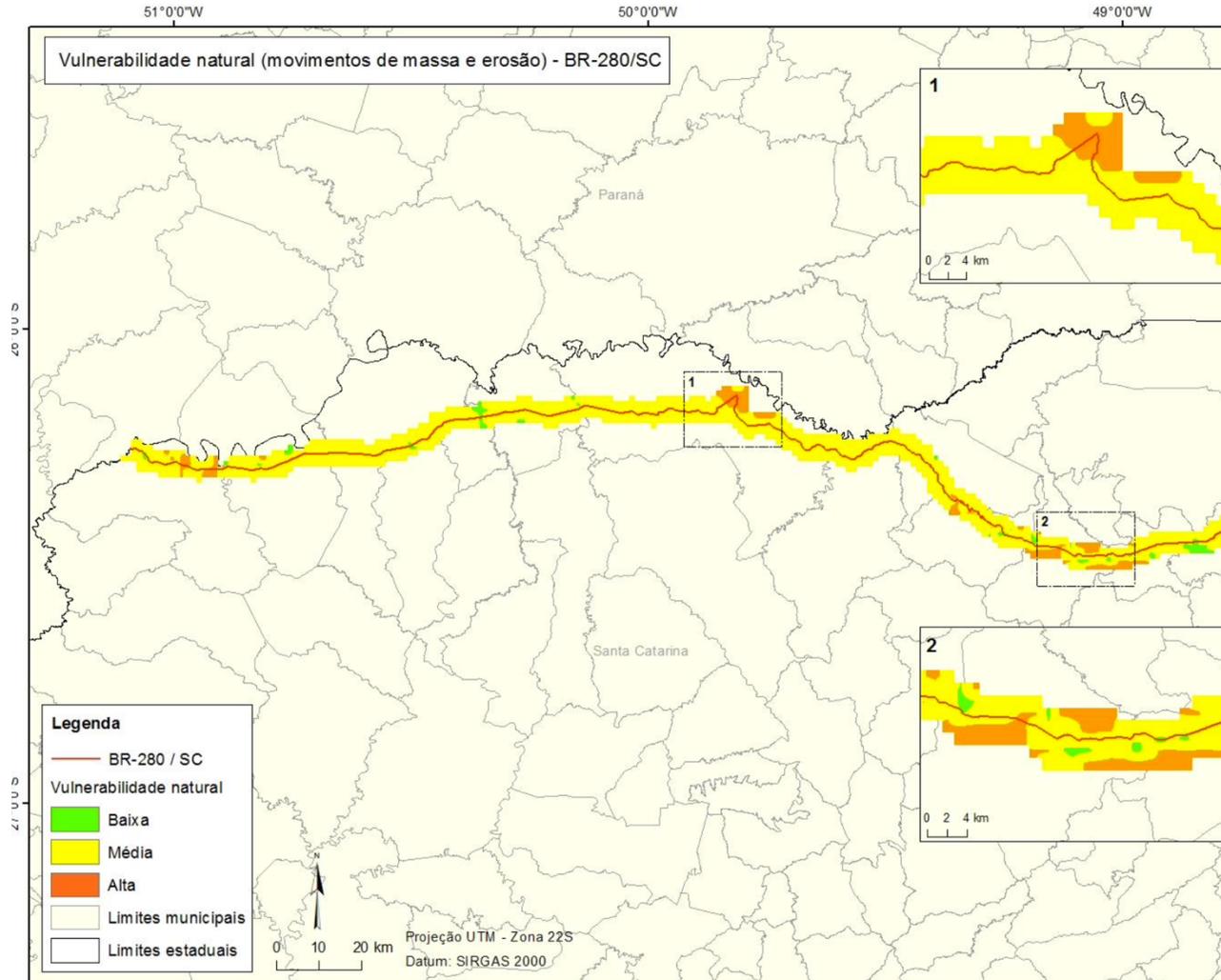


Figura 18 - Volume médio de tráfego na BR-280, em Santa Catarina



C10) Mapa de vulnerabilidade ambiental – movimentos de massa e erosão do solo

Figura 19 - Vulnerabilidade natural aos movimentos de massa e erosão do solo BR-280, em Santa Catarina



C11) Mapa de vulnerabilidade ambiental – inundações, enxurradas e alagamentos

Figura 20 - Vulnerabilidade natural às inundações, enxurradas e alagamentos na BR-280, em Santa Catarina

