

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Guilherme Cardoso da Silva

**MODELO PREDITIVO DE SUSCETIBILIDADE A  
ESCORREGAMENTOS PLANARES NO REBORDO DO PLANALTO,  
ENTRE SANTA MARIA E CANDELÁRIA-RS, UTILIZANDO O  
MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO**

Santa Maria, RS  
2019



**Guilherme Cardoso da Silva**

**MODELO PREDITIVO DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS  
PLANARES NO REBORDO DO PLANALTO, ENTRE SANTA MARIA E  
CANDELÁRIA-RS, UTILIZANDO O MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO**

Tese apresentada ao Programa de Pós  
Graduação em Geografia - PPGGEO, da  
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,  
RS), como requisito parcial para obtenção do  
título de **Doutor em Geografia**.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Andréa Valli Nummer

Santa Maria, RS  
2019

DA SILVA, GUILHERME CARDOSO  
MODELO PREDITIVO DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS  
PLANARES NO REBORDO DO PLANALTO, ENTRE SANTA MARIA E  
CANDELÁRIA-RS, UTILIZANDO O MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO /  
GUILHERME CARDOSO DA SILVA.- 2019.  
211 p.; 30 cm

Orientadora: Andréa Valli Nummer  
Coorientador: Carlos Valdir de Meneses Bateira  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de  
Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2019

1. Movimento de Massa 2. Escorregamento Planar 3.  
Técnica do Valor Informativo 4. SIG 5. Rebordo do  
Planalto I. Valli Nummer, Andréa II. Valdir de Meneses  
Bateira, Carlos III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

**Guilherme Cardoso da Silva**

**MODELO PREDITIVO DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS  
PLANARES NO REBORDO DO PLANALTO, ENTRE SANTA MARIA E  
CANDELÁRIA-RS, UTILIZANDO O MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO**

Tese apresentada ao Programa de Pós  
Graduação em Geografia - PPGGEO, da  
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,  
RS), como requisito parcial para obtenção do  
título de **Doutor em Geografia.**

**Aprovado em 13 de setembro de 2019:**

---

**Andréa Valli Nummer, Dra. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Carlos Valdir de Meneses Bateira, Dr. (FLUP) - Videoconferência**  
(Coorientador)

---

**Mauro Kumpfer Werlang, Dr. (UFSM)**

---

**Romario Trentin, Dr. (UFSM)**

---

**Vinícius Duarte Guareschi, Dr. (CMSM)**

---

**Rafael Cabral Cruz, Dr. (UNIPAMPA)**

Santa Maria, RS  
2019



## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
por acreditarem em minha capacidade  
e possibilitarem o avanço em meus estudos.*



## AGRADECIMENTOS

*Um trabalho como esse não é algo simples, são anos de um processo que por vezes parece não ter fim. Dessa forma, me sinto feliz em expressar minha extrema gratidão a muitas pessoas que fizeram parte desta jornada.*

*Primeiramente, agradeço a oportunidade de estudar na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), por tantos anos, em diferentes cursos e em um local de ensino gratuito e de qualidade.*

*Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO), por todo o processo, desde o mestrado, pelo suporte, as viagens de campo, congressos, e todas as etapas pertinentes a caminhada de pós-graduação, além de todos os professores e funcionários que fizeram parte dessa jornada.*

*À professora Andréa Valli Nummer, pelas oportunidades ao longo dessa caminhada, além da orientação e amizade ao longo de todos esses anos.*

*Ao professor Romario Trentin, pelas inúmeras colaborações, tiradas de dúvidas, debates, enfim, que foram primordiais para o andamento do trabalho.*

*Ao professor Carlos Valdir de Meneses Bateira, sempre solícito nas colaborações, mesmo com a dificuldade da comunicação a distância.*

*Ao colega de Geografia José Eduardo Bonini (USP), que também colaborou inúmeras vezes a distância, sendo fundamental na aplicação do método utilizado na pesquisa.*

*Aos diversos colegas do Laboratório de Geologia Ambiental (LAGEOLAM) ao longo desses anos, Indiara Bruna Costa Moura Moraes, Vinícius Duarte Guareschi, Matheus Bolzan, Angéli Behling, Daniel Junges Menezes, Tiéle Lopes Cabral, Wellerson Pessotto, Danielli Dias e tantos outros que de alguma forma me acompanharam nessa caminhada.*

*Aos meus pais, Rubens Omar da Silva e Karla Cardoso da Silva, minha irmã, Nathália Cardoso da Silva, e minha avó, Terezinha Ziegler da Silva, por me acompanharem sempre e serem a base forte que me ajudou a enfrentar, não só esse, mas todos os desafios da vida.*

*A minha namorada, Catherine de Lima Barchet, por ser minha grande companheira, confiante, e, muito provavelmente, a pessoa que mais conviveu com todos os processos relacionados à tese, dos mais positivos aos mais problemáticos.*

*Ao meu grande amigo, Adriano Lenz, por todas as conversas, especialmente às relacionadas ao desempenho no final da pesquisa.*

*Ao Renato Favarin Dos Santos, por me ajudar em um momento complexo e colaborar profundamente para o eterno processo de autoconhecimento.*

*Aos eternos amigos Felipe Crivellaro Minuzzi e Elisa Zago Porto, pelas conversas, especialmente no compartilhamento das questões voltadas à pós-graduação.*

*Ao amigo e colega do Instituto Federal Farroupilha (IFF), Paulo Ricardo Weissbach, pela grande ajuda em minha iniciação no instituto, e por entender e colaborar com a finalização de minha tese concomitante a iniciação na instituição.*

*Por fim, a todos que de alguma forma acrescentaram a minha vida, especialmente nessa jornada, muito obrigado.*

## EPÍGRAFE

*“Um homem honrado nunca jura.  
Contenta-se em dizer “sim” ou “não”.  
Seu respeito e reputação juram por ele”.*  
*Jean de La Bruyère.*



## RESUMO

### MODELO PREDITIVO DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS PLANARES NO REBORDO DO PLANALTO, ENTRE SANTA MARIA E CANDELÁRIA-RS, UTILIZANDO O MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO

AUTOR: Guilherme Cardoso da Silva  
ORIENTADORA: Andréa Valli Nummer

Os movimentos de massa são movimentações que ocorrem ao longo de uma vertente envolvendo o deslocamento de materiais (solos e/ou rochas), por gravidade, com ou sem a presença de água. Na região central do Rio Grande do Sul, na porção geomorfologicamente conhecida como “Rebordo do Planalto”, são comuns os processos de movimentos de massa do tipo escorregamentos e fluxos de detritos. Desta forma, o objetivo geral desta pesquisa é elaborar um modelo preditivo de suscetibilidade a escorregamentos planares para o Rebordo do Planalto entre os municípios de Santa Maria e Candelária, RS, utilizando o método do Valor Informativo. Para tanto, foi elaborado um inventário dos escorregamentos, inicialmente identificando em imagens de satélites as cicatrizes e posteriormente confirmando nos trabalhos de campo, totalizando 61 movimentos. Foram também utilizadas imagens ALOS PALSAR para elaborar uma série de mapas temáticos (hipsometria, declividade, orientação de vertente, curvatura em plano e perfil, direção de fluxo e TWI), além de dados disponibilizados pelo IBGE e CPRM (para os mapas de geomorfologia, geologia e solos), na intenção de gerar um modelo que melhor predissesse os escorregamentos planares na área de estudo. Para a geração dos modelos, utilizou-se o método do Valor Informativo. Constatou-se, a partir de testes de sensibilidade, que a declividade possui grande influência nos escorregamentos planares da área de estudo, seguida do TWI (*Topographic Wetness Index*), geomorfologia e hipsometria. Foram elaborados quatro modelos testes, com diferentes combinações de temáticas, e percebeu-se que uma combinação com maior número de variáveis retornou melhores resultados (taxa de sucesso e predição). O modelo final (modelo 4) utilizou-se das seguintes variáveis: declividade, geomorfologia, TWI, hipsometria, direção de fluxo, orientação de vertente e solo, resultando em 95% de taxa de sucesso e 92% de predição. O modelo foi dividido em cinco classes de suscetibilidade, sendo que com o grupo de estimação (utilizado na construção do modelo), as duas classes de maior suscetibilidade conseguiram prever 90,9% dos escorregamentos, e com o grupo de validação, 79,2%. Sendo assim, percebe-se que o método do Valor Informativo foi bastante efetivo para prever os movimentos de massa do tipo escorregamento planar, na área do Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul, sendo que notou-se uma grande importância da realização do inventário, além das saídas de campo. Também pôde-se perceber que apesar do melhor resultado com o maior número de variáveis, esta melhora não foi tão expressiva, demonstrando que por vezes um menor número de temáticas pode retornar um resultado quase tão efetivo quanto com a utilização de um grupo maior.

**Palavras-chave:** Movimento de Massa. Escorregamento Planar. Técnica do Valor Informativo. SIG. Rebordo do Planalto.



## ABSTRACT

### SUSCEPTIBILITY PREDICTIVE MODEL OF TRANSLATIONAL LANDSLIDE IN THE EDGE OF THE PLATEAU BETWEEN SANTA MARIA AND CANDELÁRIA-RS, USING THE INFORMATION VALUE METHOD

AUTHOR: Guilherme Cardoso da Silva

ADVISOR: Andréa Valli Nummer

Mass movements are movements that occur along a slope involving the displacement of materials (soil and/or rocks), by gravity, with or without water. In the central region of Rio Grande do Sul, in the region geomorphologically known as “edge of the Plateau”, the mass movements such as translational landslides and debris flows are common. Thus, the objective of this research is to elaborate a susceptibility predictive model of translational landslides to the edge of the Plateau between the municipalities of Santa Maria and Candelária, RS, using the Information Value method. For this purpose, an inventory of translational landslides was prepared, initially identifying scars in satellite images and later confirming in the fieldwork, totaling 61 movements. ALOS PALSAR images were also used to produce a series of thematic maps (hypsometry, slope, aspect, plan and profile curvature, flow direction and TWI), besides data provided by IBGE and CPRM (for geomorphology, geology and soil maps), in order to generate a model that best predicted translational landslides in the study area. For the elaboration of the models, the Informative Value method was used. It was found, from sensitivity tests, that the slope has great influence on the translational landslides of the study area, followed by the TWI (*Topographic Wetness Index*), geomorphology and hipsometry. Four test models were elaborated, with different combinations of themes, and it was noticed that a combination with a larger number of variables returned better results (success rate and prediction). The final model (model 4) used the following variables: slope, geomorphology, TWI, hipsometry, flow direction, aspect and soil, resulting in a 95% success rate and 92% prediction. The model was divided into five susceptibility classes, and with the estimation group (used in the construction of the model), the two most susceptible classes were able to predict 90.9% of translational landslides, and with the validation group, 79.2%. Thus, it is clear that the Informative Value method was very effective for predicting translational landslide mass movements in the Rio Grande do Sul Plateau, whereas there was a great importance of carrying out the inventory, beyond the field trips. It was also noticed that despite the best result with the largest number of variables, this improvement was not so expressive, demonstrating that sometimes fewer themes can return almost as effective as using a larger group.

**Keywords:** Mass Movement. Translational Landslide. Information Value Method. GIS. Edge of the Plateau.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem representativa e fotografia do movimento de massa tipo rastejo.....	38
Figura 2 - Imagem representativa e fotografia do movimento de massa do tipo escorregamento planar (translacional). ....	38
Figura 3 - Imagem representativa e fotografia do movimento de massa tipo escorregamento circular (rotacional). ....	39
Figura 4 - Imagem representativa e fotografia do movimento de massa do tipo escorregamento em cunha. ....	39
Figura 5 - Imagem representativa dos principais movimentos relativos às quedas, sendo eles: queda, tombamento e rolamento, e fotografia de tombamento. ....	40
Figura 6 - Imagem representativa e fotografia do movimento de massa corrida ou fluxo. ....	41
Figura 7 - Os quatro estágios dos movimentos de massa em vertentes.....	42
Figura 8 - Causas internas e externas relativas aos movimentos de massa .....	43
Figura 9 - Tipos de ruptura decorrentes da distribuição espacial das discontinuidades nos maciços rochosos. ....	46
Figura 10 - Tipos de vertentes em relação ao perfil. ....	53
Figura 11 - Combinação das curvaturas para caracterização das formas da vertente. ....	54
Figura 12 - Formas do terreno e suas relações frente ao fluxo de escoamento superficial. ....	54
Figura 13 - Figura da sucção e poropressão, diferenças na coesão da areia em contato com a água.....	57
Figura 14 - Classificação dos métodos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa. ....	61
Figura 15 - Esquema da análise do método heurístico de movimentos de massa em SIG.....	62
Figura 16 - Esquema da análise estatística bivariada de movimentos de massa em SIG.....	63
Figura 17 - Validação do modelo a partir das partições temporal, espacial e aleatória. ....	67
Figura 18 - Gráfico com os autores e fatores utilizados nos modelos de suscetibilidade. ....	86
Figura 19 - Representação dos mecanismos de espalhamento na banda C (~5,6 cm), L (~23 cm) e X (~3 cm). ....	88
Figura 20 - Exemplos de configurações geométricas que causam encurtamento de rampa, sombreamento e inversão de relevo nas imagens de radar. ....	89
Figura 21 - Ilustração dos tipos e mecanismos de retroespalhamento em ambientes florestais. ....	90
Figura 22 - Localização da área do Rebordo do Planalto no Rio Grande do Sul. No retângulo, a área de estudo. ....	91
Figura 23 - Carta-imagem da área de estudo (satélite RapidEye). ....	93
Figura 24 - Mapa litológico da área de estudo. ....	95
Figura 25 - Mapa de solos da área de estudo.....	96
Figura 26 - Mapa geomorfológico da área de estudo. ....	98
Figura 27 - Modelo conceitual da pesquisa .....	104
Figura 28 - Escorregamento no município de Santa Maria - RS com a delimitação da dinâmica de desencadeamento. ....	110
Figura 29 - Totalidade dos escorregamentos identificados e a divisão entre os grupos de estimação e validação. ....	111
Figura 30 - Escorregamentos representados por píxeis. ....	112
Figura 31 - Processamento da direção de fluxo a partir do método D8. ....	115
Figura 32 - Esquema explicativo dos valores de direção de fluxo do método D-Infinity.....	116
Figura 33 - Exemplo de tabulação das áreas com a apresentação do resultado das áreas não escorregadas (VALUE 0) e escorregadas (VALUE 1). ....	118
Figura 34 - Cálculo do Valor Informativo para a temática de declividade .....	119

Figura 35 - Exemplo de taxa de sucesso de uma temática orientação de vertente. ....	120
Figura 36 - Evidências de escorregamentos planares em diferentes municípios da Quarta Colônia, RS. ....	124
Figura 37 - Visualização de cicatrizes de escorregamentos planares no Google Earth. ....	125
Figura 38 - Escorregamentos planares em Silveira Martins, no campo auxiliar do dia 26 de maio de 2018. ....	126
Figura 39 - Escorregamentos planares confirmados no campo dos dias 15 e 16 de dezembro. ....	128
Figura 40 - Basaltos da Formação Serra Geral constatados em visita a campo. ....	129
Figura 41 - Basaltos alterados na base do perfil, recobertos por colúvio raso. ....	129
Figura 42 - Distribuição dos escorregamentos planares na área de estudo. ....	131
Figura 43 - Distribuição dos escorregamentos planares na litologia da área de estudo. ....	134
Figura 44 - Distribuição dos escorregamentos planares nos tipos de solo da área de estudo	135
Figura 45 - Distribuição dos escorregamentos planares na geomorfologia da área de estudo. ....	136
Figura 46 - Distribuição dos escorregamentos planares na hipsometria da área de estudo. ..	138
Figura 47 - Distribuição dos escorregamentos planares na declividade da área de estudo. ..	140
Figura 48 - Mapa de orientação de vertente da área de estudo com a localização dos movimentos de massa .....	141
Figura 49 - Mapa de perfil de curvatura da área de estudo com a localização dos movimentos de massa. ....	146
Figura 50 - Comparação entre o perfil de elevação do Google Earth Pro e do MDE em ambiente SIG. ....	147
Figura 51 - Comparação do perfil de elevação do MDE com o mapa de perfil de curvatura. ....	148
Figura 52 - Comparativo entre o perfil de curvatura original e após a aplicação da ferramenta Focal Statistics (ArcGIS). ....	149
Figura 53 - Comparativo entre o plano de curvatura original e após a aplicação da ferramenta Focal Statistics (ArcGIS). ....	150
Figura 54 - Uso das curvas de nível extraídas do MDE para conferência com a classificação do plano de curvatura. ....	151
Figura 55 - Mapa de plano de curvatura da área de estudo com a localização dos escorregamentos. ....	152
Figura 56 - Mapa de perfil e plano de curvatura para a área de estudo com a localização dos escorregamentos. ....	153
Figura 57 - Mapa de direção de fluxo (D-infinity) da área de estudo com a localização dos escorregamentos. ....	155
Figura 58 - Mapa de fluxo acumulado da área de estudo com a localização dos escorregamentos. ....	157
Figura 59 - Mapa de TWI ( <i>Topographic Wetness Index</i> ) da área de estudo com a localização dos escorregamentos. ....	159
Figura 60 - Percentual das classes hipsométricas na área de estudo e sua relação com as percentagens de área escorregada. ....	161
Figura 61 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de declividade. ....	162
Figura 62 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de orientação de vertente. ....	163
Figura 63 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de perfil de curvatura. ....	164
Figura 64 - Relação do percentual da área total e área escorregada de cada classe de plano de curvatura. ....	165

Figura 65 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de direção de fluxo.....	166
Figura 66 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de TWI. ....	167
Figura 67 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de litologia.	168
Figura 68 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de solo, .....	169
Figura 69 - relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de geomorfologia. ....	171
Figura 70 - Modelo de suscetibilidade 1- Declividade, Geomorfologia e TWI.....	176
Figura 71 - Curva de sucesso do modelo 1: AAC - Área Abaixo da Curva.....	177
Figura 72 - Modelo de suscetibilidade 2 - Declividade, TWI e hipsometria.....	178
Figura 73 - Curva de sucesso do modelo 2: AAC - Área Abaixo da Curva.....	179
Figura 74 - Modelo de suscetibilidade 3 - Declividade, TWI, hipsometria, Direção de fluxo e orientação de vertente. ....	180
Figura 75 - Curva de sucesso do modelo 3: AAC - Área Abaixo da Curva.....	181
Figura 76 - Modelo de suscetibilidade 4 - Declividade, Geomorfologia, TWI, hipsometria, Direção de fluxo, orientação de vertente e solo.....	182
Figura 77 - Curva de sucesso do modelo 4: AAC - Área Abaixo da Curva.....	183
Figura 78 - Curva de sucesso do modelo 1, 2, 3 e 4: AAC - Área Abaixo da Curva.....	183
Figura 79 - Quebras da curva de sucesso de AAC do modelo de suscetibilidade 4.....	185
Figura 80 - Mapa final classificado de acordo com as Classes de suscetibilidade a escorregamentos planares com base nas quebras da curva de AAC. ....	187



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Processo de atribuição do valor informativo para as classes das temáticas. ....	172
Tabela 2 - Taxas de sucesso e predição das temáticas analisadas. ....	174
Tabela 3 - Taxas de sucesso e predição dos modelos de suscetibilidade realizados. ....	184
Tabela 4 - Probabilidade espacial - grupo de estimação. ....	190
Tabela 5 - Probabilidade espacial - grupo de validação. ....	190



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de movimentos de massa por Varnes (1958).....	33
Quadro 2 - Classificação de movimentos de massa por Hutchinson (1988).....	34
Quadro 3 - Características das principais classificações de movimentos de massa.....	35
Quadro 4 - Vantagens e desvantagens das principais classificações consideradas.....	36
Quadro 5 - Principais agentes que influenciam a ocorrência de movimentos de massa, conforme Cruden e Varnes (1996).....	44
Quadro 6 - Síntese dos autores e variáveis escolhidas para a construção dos modelos de suscetibilidade a movimentos de massa.....	82



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>31</b>
2.1	MOVIMENTOS DE MASSA: CONCEITOS, CLASSIFICAÇÕES E PARÂMETROS CONTROLADORES .....	31
2.2	FATORES ENVOLVIDOS NOS PROCESSOS DE MOVIMENTOS DE MASSA..	42
2.3	MODELOS DE SUSCETIBILIDADE E EXEMPLOS DE ESTUDOS DE CASO....	60
2.3.1	Metodologias de avaliação da suscetibilidade com uso de Sistemas de Informações Geográficas .....	60
2.3.2	Técnicas de partição de inventários de movimentos de massa .....	65
2.3.3	Curvas de taxa de sucesso na predição de suscetibilidade a movimentos de massa .....	68
2.3.4	Exemplos de estudos de caso.....	69
2.4	IMAGENS ALOS PALSAR: QUALIDADE E APLICABILIDADE .....	86
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>91</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>101</b>
4.1	MATERIAIS.....	101
4.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	103
4.2.1	Levantamento bibliográfico .....	103
4.2.2	Seleção das Variáveis.....	105
4.3	MÉTODO QUANTITATIVO: ANÁLISE ESTATÍSTICA BIVARIADA - TÉCNICA DO VALOR INFORMATIVO .....	106
4.3.1	Inventário .....	108
4.3.2	Variáveis analisadas .....	113
4.3.3	Taxas de sucesso e predição .....	119
4.3.4	Elaboração dos modelos de suscetibilidade a escorregamentos .....	121
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>123</b>
5.1	INVENTÁRIO.....	123
5.2	CRUZAMENTO DAS CLASSES TEMÁTICAS COM O INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS .....	130
5.3	MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO .....	160
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>193</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>197</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa, de maneira geral, se referem aos movimentos de descida de solos e rochas sob o efeito da gravidade, geralmente potencializado pela ação da água (GUIMARÃES et al., 2008). No Brasil há registros significativos de movimentos de massa de grandes dimensões, estes causando danos materiais e perdas de vidas humanas, como nos casos das cidades de Teresópolis e Petrópolis, no estado do Rio de Janeiro, nos estados de São Paulo (com destaque para a Serra do Mar), Paraná e Santa Catarina. A região sul do Brasil se destaca por sofrer com desastres naturais, principalmente aqueles originados por fenômenos atmosféricos extremos, em sua grande maioria representados pelas tempestades. Salienta-se que, não raro, um evento vem a desencadear outros, como no caso das chuvas que podem favorecer fortemente os movimentos de massa, principalmente os do tipo escorregamento planar (translacional) e fluxo de detritos (MARCELINO, 2007).

O termo deslizamento é utilizado de forma generalizada para qualquer movimento de solo e/ou rocha que se desloca pela gravidade. Porém, de forma mais ampla, os deslizamentos ocorrem na vertente, sendo desencadeados pela interferência direta de outros agentes, como água, gelo ou ar, obtendo relação de diferentes intensidades com fatores como declividade, curvaturas, litologia, solo, entre outros (BIGARELLA, 2003).

No estado do Rio Grande do Sul não há registros de eventos de desastres naturais relacionados a movimentos de massa de grandes proporções, principalmente no que tange o contato direto desse fenômeno com a população, culminando em um desastre natural. Porém, é notória a presença de escorregamentos e fluxo de detritos em porções da Serra gaúcha, como nos municípios de Caxias, Bento Gonçalves, São Vendelino, entre outros. Na região central do Rio Grande do Sul, mais especificamente na porção geomorfologicamente conhecida como “Rebordo do Planalto”, também são comuns os processos de movimentos de massa como escorregamentos e fluxos de detritos.

O Rebordo do Planalto compreende uma área de declividade acentuada, localizado entre o Planalto Meridional e a Depressão Central, comumente coberta por colúvio e tálus. Esta porção geomorfológica, por apresentar inúmeras cicatrizes de escorregamentos planares foi escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa, e para tanto o recorte da área compreende o Rebordo do Planalto que está presente entre os municípios de Santa Maria e Candelária, no estado do Rio Grande do Sul (TRENTIN, ROBAINA E CRISTO, 2011).

A referida área de estudo engloba também alguns municípios da Quarta Colônia, que é uma importante região gaúcha, bastante conhecida por suas atividades agrícolas. Os processos

de movimentos de massa que tem ocorrido nesses municípios, na maioria das vezes, não interferem significativamente na dinâmica da população, mas por vezes danificam estradas (pavimentadas e não pavimentadas) e tendo também o potencial de prejudicar áreas de lavoura, comprometendo assim a circulação de veículos, escoamento da produção agrícola, destruição de áreas de cultivos, entre outros.

Dentro desta análise faz-se oportuno o estudo da suscetibilidade ou propensão da região aos processos de movimentos de massa (escorregamentos planares, mais especificamente), considerando uma avaliação física com base em fatores e suas variáveis com relação à predisposição da área a estes eventos. Para Julião et al. (2009), suscetibilidade é a incidência espacial do perigo, representando a propensão de uma área ser afetada por um perigo predeterminado, em um período indeterminado, sendo avaliada por meio de fatores de predisposição para a ocorrência dos processos ou ações, não contemplando o seu período de retorno ou a probabilidade de ocorrência.

Dentro do contexto da pesquisa, o termo suscetibilidade faz relação com locais mais ou menos sujeitos as ameaças de determinado fenômeno que, no caso da presente pesquisa, são os escorregamentos planares. Para tal, a utilização do geoprocessamento como ferramenta de análise é de grande valia, já sendo empregada na confecção de modelos há muitas décadas em países mais desenvolvidos tecnologicamente. Souza (2015) salienta que os estudos de suscetibilidade destacam um ou mais fenômenos naturais e como o terreno se comporta frente ao tipo de uso do solo. Dentro desta análise, devem ser avaliados os processos que podem ocorrer e os principais agentes deflagradores, independentemente da ocupação desses locais, pois os estudos de suscetibilidade visam prioritariamente avaliações do meio físico, normalmente representando seus resultados em cartas e mapas.

O objetivo geral desta pesquisa é, portanto, elaborar um modelo preditivo de suscetibilidade a escorregamentos planares, utilizando o método do Valor Informativo para o Rebordo do Planalto, entre os municípios de Santa Maria e Candelária, RS. Para tanto, tem-se como objetivos específicos: i) realizar um inventário de escorregamentos planares, identificando cicatrizes em imagens de satélite e em campo; ii) aplicar o método do Valor Informativo para desenvolver o modelo preditivo de suscetibilidade a escorregamentos planares e iii) validar o modelo preditivo com o estabelecimento da taxa de predição.

A região de Rebordo carece de uma base de dados mais detalhada, o que torna o objetivo desta pesquisa um desafio a mais. Da mesma forma, a seleção das variáveis deve considerar quais os tipos de movimentos de massa serão avaliados, por este motivo, nesta pesquisa serão

considerados especificamente os escorregamentos planares, por deixarem cicatrizes visíveis e por serem aqueles que podem afetar esta região de forma mais impactante.

No contexto deste estudo, a geração de modelos preditivos são de suma importância, e atualmente, com o uso já difundido do SIG, novos programas e extensões permitem a sua geração de forma cada vez mais efetiva, como pode ser visto em Conoscenti; Maggio e Rotigliano (2008), Van Westen; Seijmonsbergen e Mantovani (1999) e Guzzetti et al. (1999), entre outros.

No caso brasileiro, o uso da modelagem visando a predição de áreas suscetíveis a movimentos de massa possui especial importância, visto que além de se tratar de uma técnica moderna dentro do geoprocessamento, traz a possibilidade de aplicação sem um custo elevado. Isso é de extrema relevância para o país, que carece de recursos para as pesquisas, mas por outro lado possui a necessidade de compreender melhor como se dão os processos de movimentos de massa dentro de seus diferentes contextos. Ainda neste contexto, é pertinente salientar a possibilidade de aplicação de determinados produtos elaborados em pesquisas como a desta tese, por órgãos públicos, para a gestão dos seus municípios relacionada a possibilidade de ocorrência destes eventos.

Esta tese foi estruturada da seguinte forma: Introdução, que contém uma visão geral dos movimentos de massa, mais especificamente os escorregamentos planares, passando pelos principais fatores relacionados e as particularidades da área de estudo frente a temática. O Referencial Teórico, que apresenta uma discussão mais ampla sobre os conceitos básicos dos movimentos de massa, as diferentes terminologias, além do uso do SIG amplamente empregado em modelo que colaboram com a predição de áreas suscetíveis fazendo uso de mapas que possuem relação com o fenômeno. Nos Procedimentos Metodológicos, são apresentados os dados utilizados nos processamentos, os *softwares* e as etapas de aplicação da Técnica do Valor Informativo. No capítulo Resultado e discussões, estão os principais resultados dos processamentos e as discussões sobre o que pode ser inferido a partir da elaboração destes dados. Na Conclusão são apresentadas reflexões sobre diversos pontos abordados na tese, desde a relação entre teoria e prática, uma avaliação da eficácia da técnica do Valor Informativo para a pesquisa e o que se pôde concluir a partir dos resultados obtidos. No capítulo de Referências Bibliográficas são apresentados todos os materiais (artigos científicos, teses, etc.) das diferentes áreas de conhecimento que colaboraram para a compreensão da temática e desenvolvimento desta pesquisa.



## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Os desastres naturais no Brasil estão fortemente ligados à origem atmosférica, em que a precipitação, seja por excesso ou por escassez (a depender do tipo de desastre), é o elemento que mais contribui para este fato, especialmente na região sul do país. Além das particularidades de cada local, os desastres naturais irão se estabelecer de forma diferenciada de acordo com as atividades da sociedade e como elas são refletidas no ambiente. Assim, os desastres naturais são conceituados como resultado do impacto de um fenômeno natural extremo ou intenso sobre um sistema social, causando sérios danos e prejuízos que ultrapassam a capacidade da população de conviver com o ocorrido (TOBIN e MONTZ, 1997).

Eventos como os movimentos de massa também são responsáveis por muitos desastres que ocorrem no Brasil em estados como Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina, possuindo destaque como importante modelador do relevo na superfície terrestre e sendo entendidos como o deslocamento de material, solo e/ou rocha, vertente abaixo, e tendo relação com importantes agentes como a água, o gelo e o ar. A mobilização do material se deve a sua condição de instabilidade, podendo culminar em acidentes que causam prejuízos materiais e até mesmo perda de vidas humanas (BIGARELLA, 2003; CHRISTOFOLETTI, 1999).

Os estudos referentes à modelagem da suscetibilidade de determinadas áreas a movimentos de massa são comumente auxiliados pela cartografia, e mais recentemente pelo uso das geotecnologias, como os SIGs. Desta forma, tem-se trabalhado de maneira expressiva com o conceito de suscetibilidade, que dentro deste contexto nada mais é que a capacidade de determinada vertente de sofrer com movimentos de massa, sendo levados em consideração alguns fatores de predisposição ou parâmetros e dimensões físicas. Desta forma, pode-se gerar modelos de suscetibilidade por meio do geoprocessamento, que possibilitam a previsão de áreas que poderão ser afetadas por movimentos de massa. Vale ressaltar que os modelos de suscetibilidade se constituem em uma parte importante na avaliação de risco. Assim, para a elaboração desta tese se fez necessária uma revisão bibliográfica sobre os seguintes temas: movimentos de massa e modelagem com utilização de SIG.

### **2.1 MOVIMENTOS DE MASSA: CONCEITOS, CLASSIFICAÇÕES E PARÂMETROS CONTROLADORES**

Os movimentos de massa modificam o relevo, envolvendo certo volume de massa (solo e/ou rocha), sendo condicionados por uma série de fatores. Estes podem agir em diferentes

intensidades e em tipos de materiais distintos, o que caracteriza, e, conseqüentemente, dá nome ao movimento ocorrido (MACIEL FILHO e NUMMER, 2014).

Há muitas denominações ou sinônimos para movimentos de massa, sendo muitas vezes utilizadas as designações “deslizamento”, “escorregamentos”, “movimentos gravitacionais de massa”, entre outras. Para evitar equívocos, na presente pesquisa foi utilizado o termo “movimento de massa”, por se tratar de uma denominação mais abrangente, além de amplamente utilizada na área da geografia (dissertações, teses, e, especialmente, artigos científicos).

As primeiras classificações de movimentos de massa amplamente conhecidas não foram elaboradas no Brasil, porém alguns autores brasileiros com base na classificação estrangeira, adaptaram suas classificações considerando o clima brasileiro, e o tipo de material envolvido. Outro ponto importante de se destacar, é que a bibliografia acerca dos autores que produziram as diferentes classificações de movimentos de massa é bastante extensa, fazendo com que, ao comentar sobre este tema, inevitavelmente alguns autores fiquem de fora em detrimento de outros destacados.

A literatura internacional, além de mais antiga, é também mais volumosa, sendo pertinente destacar pesquisadores como Sharpe (1938), Terzaghi (1950), Varnes (1958), Sassa (1985) e Hutchinson (1988). No Brasil destacam-se Vargas e Pichler (1957), Guidicini e Nieble (1984) e Freire (1965).

Conforme a literatura internacional, Baltzer (1875) é indicado como um dos primeiros pesquisadores a levar em consideração as quedas, os escorregamentos e os escoamentos de solo e rocha como os principais tipos de movimentos de massa. Seguindo a ordem cronológica, essa classificação teria sido aperfeiçoada por Heim (1932), Sharpe (1938) e Terzaghi (1950). Entretanto, as classificações de (VARNES (1958, 1978) e Hutchinson (1988), ficaram consagradas no meio científico, sendo as mais usadas em pesquisas em geral e como base para novas classificações (AHRENDT, 2005).

Outro ponto importante é o local em que a classificação é utilizada, e a conseqüente diferença do idioma. Neste sentido, Cruden et al. (1994) buscam unificar as terminologias dos movimentos de massa, definindo o termo escorregamento como sendo um movimento de massa rochoso, terroso ou de detritos, encosta a jusante. Os autores escreveram um glossário de termos intitulado *Multilingual Landslide Glossary*, com cerca de 50 termos, apresentados em chinês, francês, alemão, espanhol, russo e inglês. Essas classificações eram acompanhadas de ilustrações e esquemas, na intenção de se fazer compreender os principais aspectos dos respectivos movimentos de massa (AHRENDT, 2005).

Na classificação de Varnes (1958), usada comumente na engenharia civil-geotecnia, o termo “movimentos de encosta” é sinônimo de “escorregamentos”. O autor se baseou nos seguintes atributos para sua classificação: tipo de material; taxa de movimentação; geometria da área de ruptura e do depósito resultante; idade; causa; grau de ruptura da massa deslocada; relação ou não da geometria do movimento com as estruturas geológicas; localização geográfica e o seu estado de atividade. Nesta classificação, os dois primeiros critérios foram os mais relevantes e, assim, o autor divide os movimentos de massa em cinco classes conforme o Quadro 1. Pode-se dizer então, que a classificação apresentada por Varnes (1958) foi considerada pouco detalhada, mas tinha como vantagem o fato de ser muito clara em suas definições.

Quadro 1 - Classificação de movimentos de massa por Varnes (1958).

Tipo de Movimento			Tipo de Material		
			Substrato rochoso	Solos para engenharia civil	
				grossos	finos
Quedas			de rochas	de detritos	de solos
Tombamentos			de rochas	de detritos	de solos
Escorregame ntos	Rotacional	Poucas unidades	deslizamento de rochas	deslizamento de detritos	deslizamento de solos
		Muitas unidades	de blocos rochosos	de blocos detritos	de blocos solo
	translacional		de rochas	de detritos	de solo
Espalhamentos laterais			de rochas	de detritos	de solo
Escoamentos			de rochas (deep cree)	de detritos	de solo
Complexos			Combinação de dois ou mais tipos de movimentos		

Fonte: (ADAPTADO DE AHRENDT, 2005).

A classificação de Hutchinson (1988), bastante extensa e detalhada, envolve a morfologia da massa movimentada, o tipo de material, a velocidade do movimento, as condições de poropressão e características gerais do solo, conforme o Quadro 2. Cabe salientar que ao mesmo tempo em que uma classificação mais complexa pode parecer mais completa, trazendo mais detalhes ao pesquisador (o que não é uma regra), pode, também, impor dificuldades ao ser utilizada em campo, cabendo ao profissional decidir qual classificação melhor se adequa aos seus objetivos (AHRENDT, 2005).

A classificação de Hutchinson (1988) foi baseada na de Varnes (1958 e 1978), e apresenta uma abordagem dos movimentos de massa fundamentada na morfologia dos movimentos da vertente e dos materiais movidos. Também considera o mecanismo, material e

taxa de movimentação, sendo excluído qualquer movimento em grande escala, como os que envolvem tectônica, subsidência e outras formas de afundamento da superfície. O autor acredita que os movimentos de massa são influenciados basicamente pela litologia, geologia estrutural, hidrogeologia, topografia, clima, vegetação, sismicidade e erosão. A isso se deve a complexidade da classificação, pois com uma variedade tão grande de fatores, é normal ser identificado um grande número de processos (AHRENDT, 2005).

Na classificação de Cruden e Varnes (1996), qualquer movimento de massa pode ser descrito e classificado por dois nomes. O primeiro descreve o tipo de movimento e o segundo o material. Já na classificação de Varnes (1978) são levados em consideração três tipos de material, com uma matriz bidimensional, ao passo que em Leroueil et al. (1996) são nove tipos, numa matriz tridimensional (NUMMER, 2003).

Rodrigues (1998) fez um importante trabalho dentro desta análise, pois realizou um resumo das principais classificações de movimentos de massa até o ano de 1995, expondo de forma simplificada, em um quadro, as características principais de cada classificação mostrando também, segundo sua avaliação, as vantagens e desvantagens de cada uma, de acordo com os Quadros 3 e 4.

Uma das primeiras classificações de movimento de massa no Brasil foi a de Jones (1993), que foi citada por Thomas (1994). Outras classificações relevantes são as de Freire (1965); Guidicini e Nieble (1984) e IPT (1991). Dentre os movimentos de massa, destacam-se aqui: rastejo, corrida de massa (fluxos), escorregamentos (rotacional, translacional e em cunha), e quedas/tombamentos. Nesta tese será utilizada como base a classificação brasileira do IPT (1981) (modificada por AUGUSTO FILHO (1992), principalmente por ser de fácil utilização em campo. Para as denominações, será utilizado o termo escorregamento planar, que é o tipo de movimento de massa tratado na pesquisa.

Quadro 2 - Classificação de movimentos de massa por Hutchinson (1988).

(continua)

<b>Tipos</b>	<b>Subtipos</b>	
<b><i>Rebound</i></b>	Artificiais Naturais	
<b>Rastejo</b>	Superficial A grandes profundidades ( <i>deep-seated</i> ) Anterior a ruptura ( <i>pre failure</i> ) Posterior a ruptura ( <i>post failure</i> )	- Rastejo de solo ou tálus - Rastejo de gelo, gelifluxão
<b><i>Sagging of mountain slopes</i></b>	Um lado da encosta Dois lados da encosta Combinado com tombamento	- Rotacional - Combinado - Rotacional - Combinado

(conclusão)

<b>Escorregamentos</b>	Ruptura confinada	- Taludes naturais - Taludes artificiais
	Rotacionais	- Simples - Sucessivos - Múltiplos
	Compostos	- Liberados por cisalhamento interno - Progressivos
	Translacionais	- em placas ( <i>sheet</i> ) - em lascas ( <i>slab/flake</i> ) - em turfas ( <i>peat/bog</i> ) - em rochas (planar, escalonado, cunha) - detritos (não periglacial e periglacial) - espalhamento lateral repentino
<b>Escoamento ou fluxo (<i>Flow-like form</i>)</b>	<i>mudslides</i>	- Placas - Alongados
	<i>flow slides</i> <i>debris flows</i>	- Sem coesão - Materiais ligeiramente cimentados - Rochas brandas muito porosas
	<i>Rock avalanche</i>	- Detritos de rochas intemperizadas - Materiais orgânicos - Materiais provenientes de vulcões
<b>Tombamentos</b>	Descontinuidades pré-existentes Fissuras de tração em material intacto	- simples - múltiplos
<b>Quedas</b>	Primárias Secundárias	
<b>Complexos</b>		

Fonte: (ADAPTADO DE HUTCHINSON, 1988).

Quadro 3 - Características das principais classificações de movimentos de massa.

(continua)

<b>Itens Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Sharpe</b>	1938	Solo Rocha Gelo Mistura	Geomórficos Velocidade	6 básicos	Natural	Sim	Não		Sim
<b>Varnes</b>	1958	Solo Rocha	Geometria	6 básicos	Natural	Sim	1978 1985	Vel. e subtipos	Não
<b>Freire</b>	1965	Solo	Geometria	6 básicos	Natural	Sim	Não		Sim

(conclusão)

<b>Nemcor</b>	1972	Rocha Mistura  Solo Rocha	Geomórfico Velocidade  Geometria Estruturais	Quedas Fluxos Rastejo Escorreg.	Natural	Sim	Não		Não
<b>Zaruba e Mencl</b>	1976	Solo Rocha	Geometria	-	Natural	Sim	-	-	-
<b>Hasengawa</b>	1985	Solo Rocha	Geomórficos Landform Zona de transferência Superfície de rompimento	Escorreg Quedas Fluxos Rastejo	Natural	Sim	Não	-	Não
<b>Sassa</b>	1985	Solo Rocha	Geometria Velocidade Estruturas	Quedas Tombam. Solifluxão	Natural	Sim	-	-	Não
<b>Hutchinson</b>	1988	Solo Rocha Mistura	Geomórficos Geometria Estruturas Velocidade	6 básicos Recuo Ruptura	Natural Induzid o	Sim	-	-	Sim
<b>Lansheng et al.</b>	1995	Solo Rocha	-	-	-	-	-	-	-

Em que: 2 = materiais considerados; 3 = atributos considerados; 4 = tipos de movimentos considerados; 5 = origem dos movimentos (naturais ou induzidos); 6 = existência ou não de detalhamento na descrição dos movimentos; 7 = se há versões mais recentes com adaptações; 8 = principais modificações; 9 = consideração de processos correlatos ou não.

Fonte: (ADAPTADO DE RODRIGUES, 1998).

#### Quadro 4 - Vantagens e desvantagens das principais classificações consideradas

<b>AUTORES</b>	<b>VANTAGENS</b>	<b>DESVANTAGENS</b>
<b>Sharpe</b>	- Números e processo - Associação velocidade/geologia	- Dificil entendimento
<b>Varnes</b>	- Clareza - Subdivisões - Básica	- Não considera movimentos induzidos - Não apresenta correlações
<b>Freire</b>	- Detalhada - Baseada em Sharpe e Varnes - Atributos considerados	- Dificil entendimento
<b>Hasengawa Sassa Hutchinson</b>	- Baseado em Varnes - Modelos dos mecanismos - Mais completa pois considera natural e induzido, e processos correlatos	- Modelos teóricos

Fonte: (RODRIGUES, 1998).

Há diversas classificações para os movimentos de massa, dependendo da área de atuação dos profissionais envolvidos, ou seja, se geógrafos, geólogos, engenheiros civis, entre outros. No contexto do presente trabalho, cabe uma classificação bastante objetiva, mas que cumpre a função necessária, que é a de deixar clara as diferenças entre os movimentos de massa, compreendendo o tipo de material e a velocidade do movimento, que é o que basicamente é avaliado para a observação inicial do processo. Assim, classificam-se rastejo, escorregamentos, quedas e corridas de massa (AUGUSTO FILHO, 1992; GUIDICINI e NIEBLE, 1983; IPT, 1991).

As diferenças na classificação se dão devido a distinções de abordagem, já que em alguns casos são levados em consideração principalmente a geomorfologia, o que não quer dizer que outros fatores são desconsiderados, apenas que possuem menor relevância dependendo do foco do estudo. Por vezes, também, há uma evidência em conjunto, em que se pode, por exemplo, destacar a geomorfologia e a geologia frente aos demais fatores. Outra questão, também pertinente, é o número de variáveis, desta forma um trabalho pode utilizar na classificação o mesmo fator em evidência, mas trabalhar com um número significativamente diferente de variáveis, assim, possivelmente, a importância desse fator destacado será “diluído”, e as classificações tendem a se apresentar diferentemente.

Os rastejos são os movimentos mais lentos e não necessitam de uma declividade tão acentuada para ocorrer, principalmente quando da presença de colúvio e tálus (MASSAD, 2010). Por não se tratar de um movimento rápido e ter caráter sazonal, podem ser percebidos no campo por meio da presença de feições de instabilização, como trincas no solo, degraus de abatimento, deformações na superfície e surgências d'água na base da vertente. Não apresenta uma superfície de ruptura (plano de movimentação) definida, ocorrendo sobre superfícies de ruptura irregulares e podendo passar para movimentos mais acelerados como escorregamentos quando das intervenções nas encostas ou taludes, no sopé da vertente afetada, como cortes, por exemplo. Salienta-se sempre a possibilidade de os movimentos ocorrerem de forma isolada ou associados a outro(s). Apesar de um movimento sutil comparado a outros, é bastante fácil identificar quando ele está ocorrendo, visto que árvores, cercas e postes, por exemplo, comumente aparecem inclinados devido à movimentação do solo superficial, evidenciando o fenômeno, conforme a Figura 1.

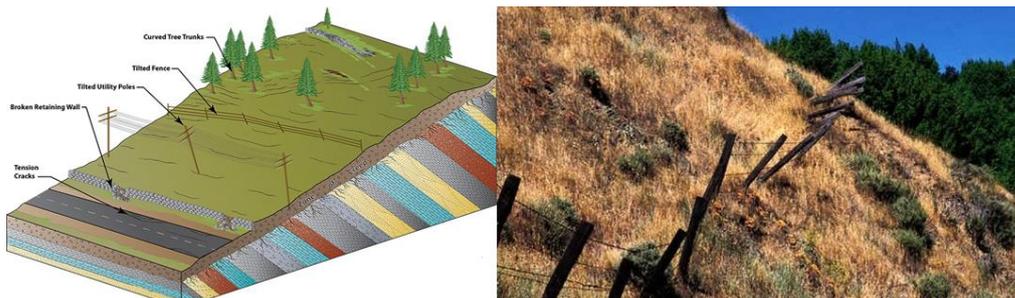
Os escorregamentos são movimentos que ocorrem em declividades mais acentuadas, conseqüentemente, possuem uma velocidade mais alta (m/h ou até mesmo m/s), sendo marcantes na evolução das vertentes. Possuem uma superfície de ruptura que pode ser planar

(translacional), circular (rotacional) ou em cunha, acompanhando os planos de fragilidade estrutural dos maciços terrosos ou rochosos (AUGUSTO FILHO, 1993; IPT, 2014).

Os escorregamentos planares (translacionais) são processos bastante frequentes em alguns locais do Brasil, ocorrendo normalmente em solos rasos, mais jovens, em vertentes de alta declividade. Possuem uma espessura pouco expressiva e uma forma retangular, tendo o comprimento bastante superior à largura, conforme a Figura 2 (MASSAD, 2010).

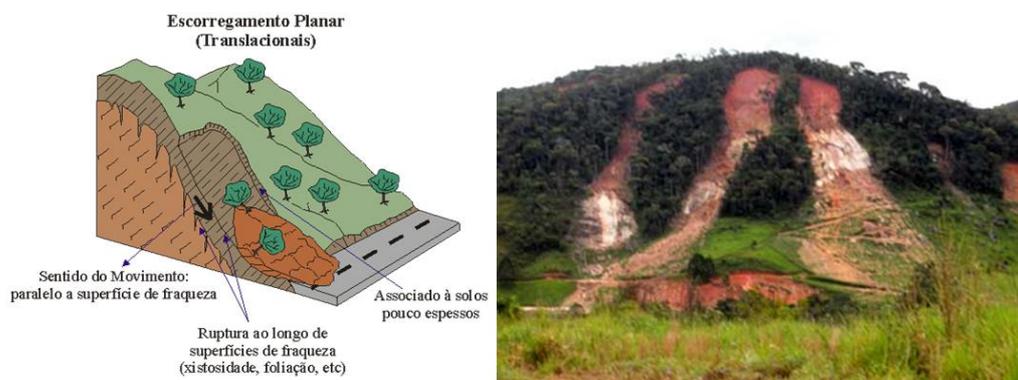
Os escorregamentos rotacionais, como o próprio nome sugere, possuem superfície de cisalhamento curva, sendo comum o aparecimento de rupturas combinadas e sucessivas. Possuem um raio de ação menor quando comparado aos translacionais, e estão, normalmente, atrelados a pacotes de solo, rocha muito alterada, aterros, ou depósitos superficiais com maior espessura, conforme a Figura 3 (MASSAD, 2010).

Figura 1 - Imagem representativa e fotografia do movimento de massa tipo rastejo



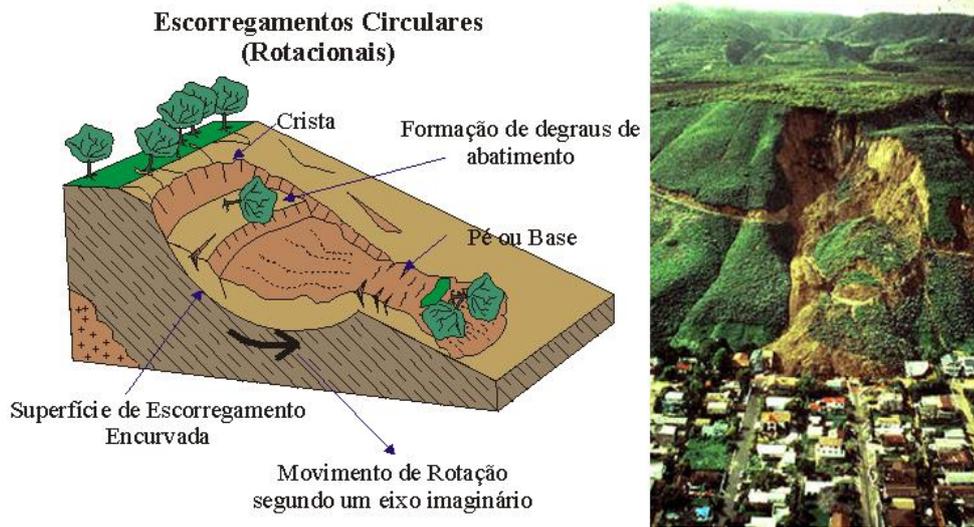
Fonte: <http://www.wsgs.wyo.gov/hazards/landslides>.  
<https://macmunn.weebly.com/ch-6-weathering--erosion.html>.

Figura 2 - Imagem representativa e fotografia do movimento de massa do tipo escorregamento planar (translacional).



Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09b.html>.  
[http://www.forumdaconstrucao.com.br/materias/imagens/00888\\_01.jpg](http://www.forumdaconstrucao.com.br/materias/imagens/00888_01.jpg).

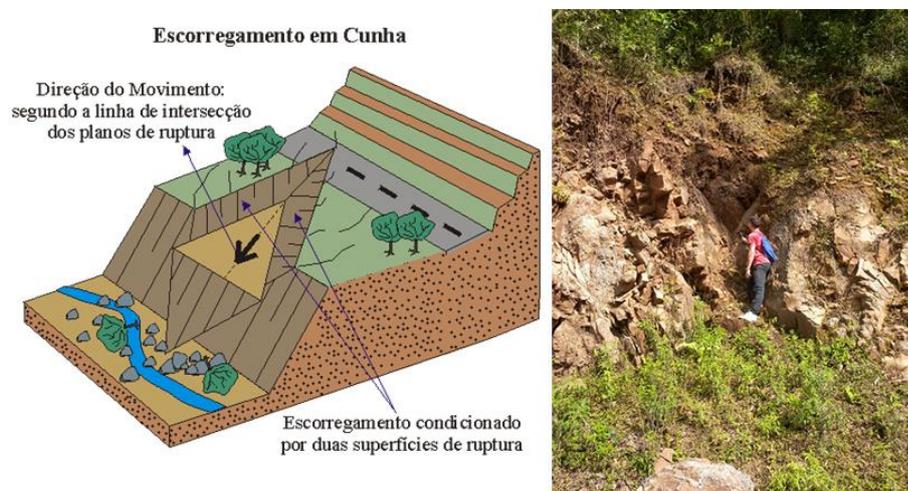
Figura 3 - Imagem representativa e fotografia do movimento de massa tipo escorregamento circular (rotacional).



Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09c.html>.  
<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/fotos/interacao/escor01.jpg>.

Por fim, os escorregamentos em cunha são normalmente associados ao saprólito e maciços rochosos, sendo caracterizados pela existência de dois planos de fraqueza concomitantes, sendo a intersecção entre eles o local que favorece o movimento. Esse tipo de fenômeno é mais comum em taludes de corte ou atrelado a acontecimentos erosivos ou de movimentos anteriores, conforme a Figura 4 (MASSAD, 2010).

Figura 4 - Imagem representativa e fotografia do movimento de massa do tipo escorregamento em cunha.

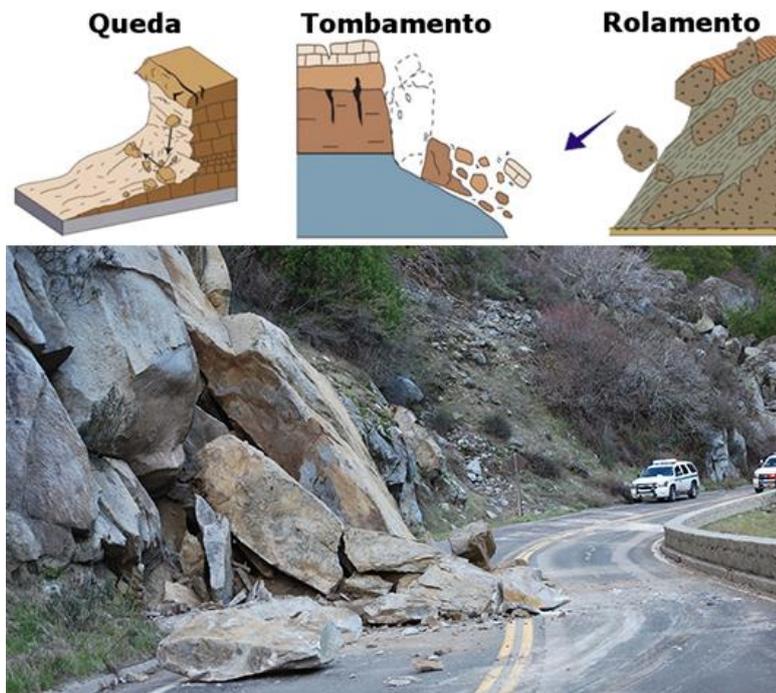


Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09d.html>. e fotografia de trabalho de campo do dia 14 de outubro de 2016.

As quedas são movimentos extremamente rápidos (m/s) envolvendo blocos e/ou lascas e matacões rochosos em movimento de queda livre, que se desprendem de vertentes íngremes. O processo ocorre normalmente em afloramentos de rocha em relevo abrupto ou taludes de escavação, como cortes em rocha, frentes de lavra, entre outros, sendo potencializados pelas amplitudes térmicas, por meio da dilatação e contração da rocha (intemperismo físico), podendo ser deflagrado por eventos chuvosos ou não (MASSAD, 2010).

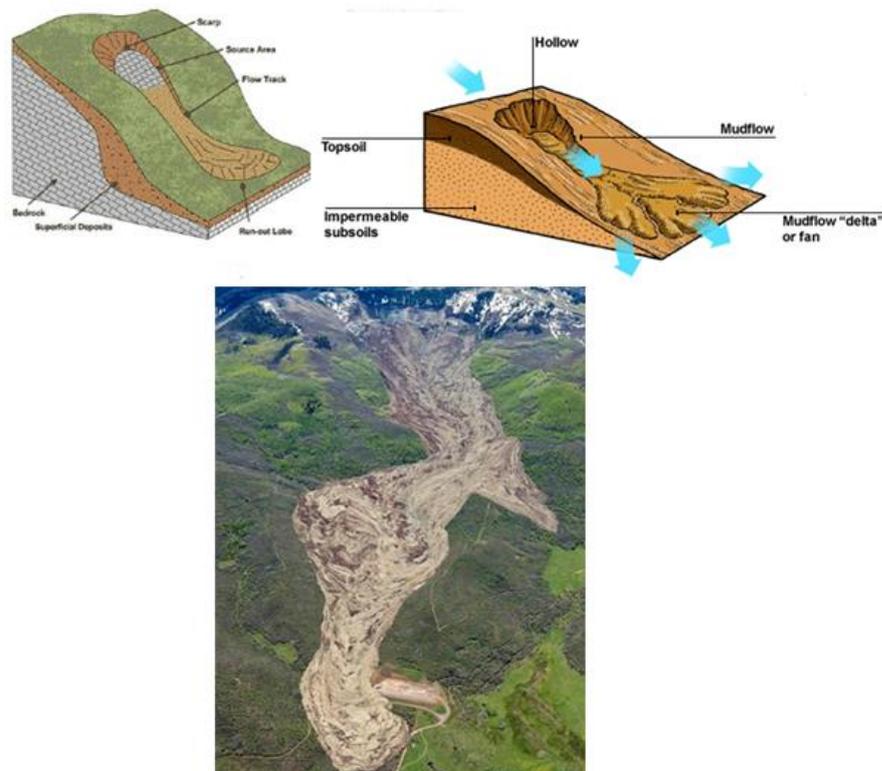
A presença de descontinuidades no maciço rochoso que propiciam o isolamento de blocos de rocha, a poropressão por meio do acúmulo de água e o crescimento de raízes nas descontinuidades das rochas também são fatores importantes para a ocorrência deste tipo de movimento de massa. Não é incomum que o material movido se quebre com o impacto da queda, e a partir daí role pela superfície da vertente, podendo ser parado por algum obstáculo da vertente ou ao atingir a porção plana do terreno. O movimento também é influenciado pela declividade da vertente e a forma e dimensão do material mobilizado, alterando assim sua velocidade, trajetória e alcance. Cabe destacar, também, que este movimento envolve quedas livres, rolamentos e tombamentos, conforme a Figura 5 (MASSAD, 2010).

Figura 5 - Imagem representativa dos principais movimentos relativos às quedas, sendo eles: queda, tombamento e rolamento, e fotografia de tombamento.



As corridas de detritos são movimentos complexos e de alta energia de transporte, ligados a eventos pluviométricos expressivos. É caracterizado por fluxos concentrados de blocos rochosos e troncos vegetais imersos com alta concentração de sedimentos de diferentes granulometrias, provindas de escorregamentos na vertente e do retrabalhamento de depósitos anteriores ao longo de um curso d'água, tendo comportamento líquido viscoso e alto poder de transporte (MASSAD, 2010). São fenômenos mais raros que os escorregamentos, mas possuem um potencial maior de provocar consequências devastadoras, devido ao seu alto poder destrutivo, além de um raio de alcance maior. Na literatura internacional, as corridas de massa são conhecidas como *mud flow*, ou *debris flow*, e, na nacional, também pode ser denominada de corrida de lama, corrida de detritos, fluxo de detritos, corrida de blocos, entre possíveis outros, dependendo da velocidade do movimento e dos materiais presentes, conforme a Figura 6 (MASSAD, 2010).

Figura 6 - Imagem representativa e fotografia do movimento de massa corrida ou fluxo.



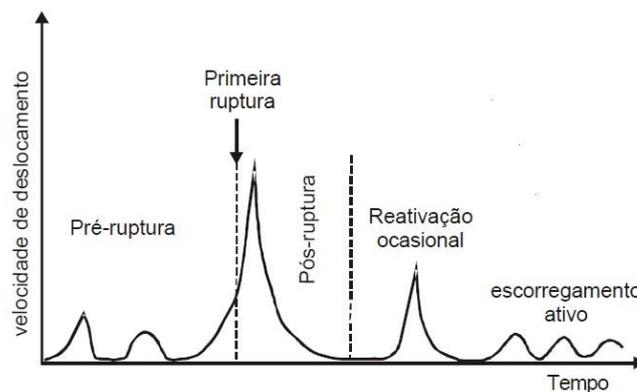
Fonte: <http://www.gov.scot/Publications/2005/07/08131738/17492>.  
<http://www.glogster.com/taraphoenix/osceola-mud-flow/g-619e1dmcb2a5i95qanebja0>.  
<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/564x/ce/45/41/ce45411947e459a22206d968f3073dfb.jpg>

É pertinente esclarecer que nem sempre os movimentos ocorrem separadamente, podendo-se até mesmo dizer que na maioria dos casos eles acontecem em conjunto, ou seja, um na sequência do outro, sendo conhecidos como movimentos de massa complexos. Bonuccelli (1999) afirma que as combinações mais comumente encontradas são a das quedas e rolamentos de blocos associadas a escoamentos de materiais grosseiros (detritos), e escorregamentos com escoamentos de solo e detritos. Neste sentido, são vários os parâmetros ou fatores que influenciam os processos de movimentos de massa, e a importância de cada um deles vai variar de acordo as particularidades da área de estudo e do processo analisado em questão.

## 2.2 FATORES ENVOLVIDOS NOS PROCESSOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Para a previsão dos movimentos de massa, é importante observar os diferentes momentos, ou estágios, em que eles ocorrem, tornando mais fácil a sua compreensão e análise. Leroueil (2001) distingue quatro estágios dentro deste contexto, são eles: pré-ruptura, ruptura, pós-ruptura e reativação. O estágio de pré-ruptura é relativo ao processo de deformação que tem potencial de levar à ruptura, sendo controlado basicamente pelas mudanças na resistência, rastejo ou ruptura progressiva. O estágio de ruptura é relativo à formação de uma superfície contínua de cisalhamento no solo. O pós-ruptura abrange a movimentação da massa de solo ou rocha desde sua ruptura até o término de sua movimentação, com a evidência de um aumento da razão de deslocamento seguido da diminuição progressiva da velocidade. Por fim, o estágio de reativação se dá quando uma massa de solo desliza ao longo de uma ou mais superfícies de ruptura pré-existentes. A Figura 7 ilustra os estágios apresentados anteriormente.

Figura 7 - Os quatro estágios dos movimentos de massa em vertentes

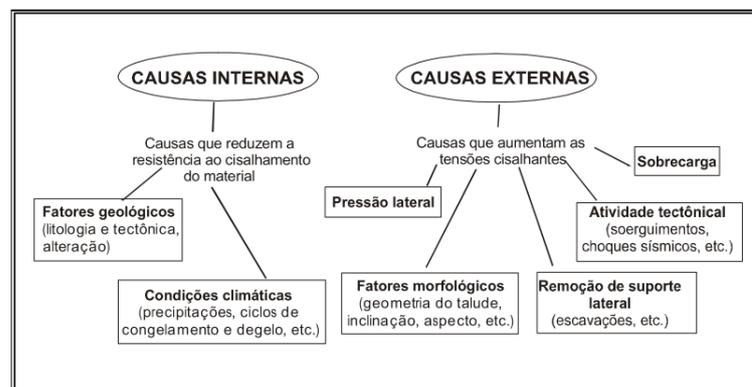


Sabe-se que, na natureza, o relevo está em constante modificação, em que o intemperismo desgasta as rochas (com destaque a alteração química que significa a desagregação que permita a criação de espaço vazios (poros) que potencializam a poro pressão), a erosão evidencia o transporte de sedimentos e os movimentos de massa levam grandes porções de material de partes mais elevadas para mais baixas, de acordo com a ação da gravidade. Desta maneira, diante destas forças atuantes, o relevo tende ao plano, havendo diferenças na frequência e intensidade com que estes fenômenos irão ocorrer nas diferentes porções do terreno. Da mesma maneira, podem surgir uma gama de fenômenos que favorecem variações no relevo, reestabelecendo assim as diferenças de altitude no ambiente, seja por movimentos tectônicos e/ou processos superficiais.

Dentre os fatores que influenciam os movimentos de massa, estão: a geologia (tipo de rocha, descontinuidades, textura/estrutura, porosidade/permeabilidade, o solo (residuais/transportados), a geomorfologia (declividade, forma da vertente em perfil e plano de curvatura, orientação, entre outros), a hidrologia (como a água interfere nas condições do material) e o fator antrópico (uso e ocupação da terra/solo). Cabe levar em consideração que cada área a ser analisada apresentará particularidades, havendo a necessidade de cautela na seleção dos fatores pertinentes (AHRENDT, 2005).

Uma forma de abordagem para as causas dos movimentos de massa foi apresentada por Terzaghi (1950 apud PANIZZA, 1996), onde o autor as separou em duas grandes categorias: causas internas e externas. As causas internas seriam aquelas resultantes da diminuição da resistência disponível do material presente, e as externas relativas às tensões cisalhantes por modificações da morfologia do talude, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Causas internas e externas relativas aos movimentos de massa



Cruden e Varnes (1996) elencaram os principais agentes atuantes nos movimentos de massa, sendo eles agentes geológicos, morfológicos, físicos e antrópicos, conforme o Quadro 5. Os movimentos de massa podem ocorrer em diferentes velocidades, formas e extensões, o que vai interferir no quanto a sociedade será afetada. Também é válido perceber que raramente um fator vai ser definitivo para caracterizar o fenômeno, e sim a interação entre vários deles, chegando no ponto limite do equilíbrio da vertente, que vindo a romper, provoca o movimento. Neste ponto também entra a ação antrópica, que pode tanto colaborar para o impedimento do fenômeno, como (comumente) favorecê-lo. Caso ele ocorra em um local que não afeta a vida humana, ele é simplesmente considerado um evento natural (MARCELINO, 2007).

Quadro 5 - Principais agentes que influenciam a ocorrência de movimentos de massa, conforme Cruden e Varnes (1996).

AGENTES GEOLÓGICOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- materiais alterados, enfraquecidos ou intemperizados</li> <li>- materiais cisalhados, fissurados ou fraturados (descontinuidades)</li> <li>- contrastes na permeabilidade</li> <li>- contrastes na espessura (material espesso e denso sobreposto a materiais com comportamento plástico)</li> </ul>
AGENTES MORFOLÓGICOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tectonismo ou vulcanismo</li> <li>- qualquer tipo de erosão</li> <li>- deposição no topo ou na base da encosta</li> <li>- remoção da vegetação</li> </ul>
AGENTES FÍSICOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- chuva intensa ou excepcionalmente prolongada</li> <li>- degelo repentino</li> <li>- intemperismo por congelamento e degelo</li> <li>- abalo sísmico</li> <li>- erupção vulcânica</li> <li>- intemperismo de material expansivo</li> </ul>
AGENTES ANTRÓPICOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- escavação da encosta ou da sua base (remoção do suporte) – urbanização</li> <li>- sobrecarga no topo ou na encosta</li> <li>- diminuição do nível dos reservatórios</li> <li>- desmatamento</li> <li>- irrigação</li> <li>- mineração</li> <li>- vibração artificial</li> <li>- vazamentos</li> </ul>

Fonte: (CRUDEN E VARNES, 1996 ADAPTADO DE AHRENDT, 2005).

Os processos de movimento de massa são deflagrados após períodos chuvosos. O que se apresenta aqui, não é o clima propriamente dito, mas sim a forma como a água interfere nesse processo, por exemplo, como é o comportamento da água no talude, a resistência ao cisalhamento, poropressão, sucção, etc.

É de grande importância que os profissionais, que se propõem a realizar o estudo de suscetibilidade a movimentos de massa de determinada região, tenham conhecimento detalhado do processo ocorrido nas vertentes, bem como da compreensão dos fatores envolvidos nos processos, incluindo o conhecimento de geologia, geomorfologia, hidrogeologia e mecânica (MACEDO e BRESSANI, 2013). Portanto, os fatores pertinentes que controlam os processos de movimento de massa a serem analisados na presente pesquisa são os geológicos, morfológicos, hidrológicos e antrópicos, como detalhado a seguir.

### ➤ FATORES GEOLÓGICOS

Entre os fatores geológicos pode-se citar: litologia, solos e depósitos superficiais. Estas variáveis estão relacionadas ao tipo e distribuição dos materiais que compõem o substrato das vertentes, sendo, ainda, levados em consideração elementos como grau de alteração do maciço rochoso, presença de estruturas geológicas como: acamadamento, disjunções, foliações, fraturas, falha etc., que vão nortear o comportamento do material.

As rochas são agregados naturais compostos por pelo menos um tipo de mineral e/ou fragmentos de outras rochas, também podendo ser compostas por vidro vulcânico e matéria orgânica. Os minerais são como constituintes fundamentais para a rocha, e é a partir do reconhecimento deles que as rochas são identificadas e classificadas (MACIEL FILHO e NUMMER, 2014).

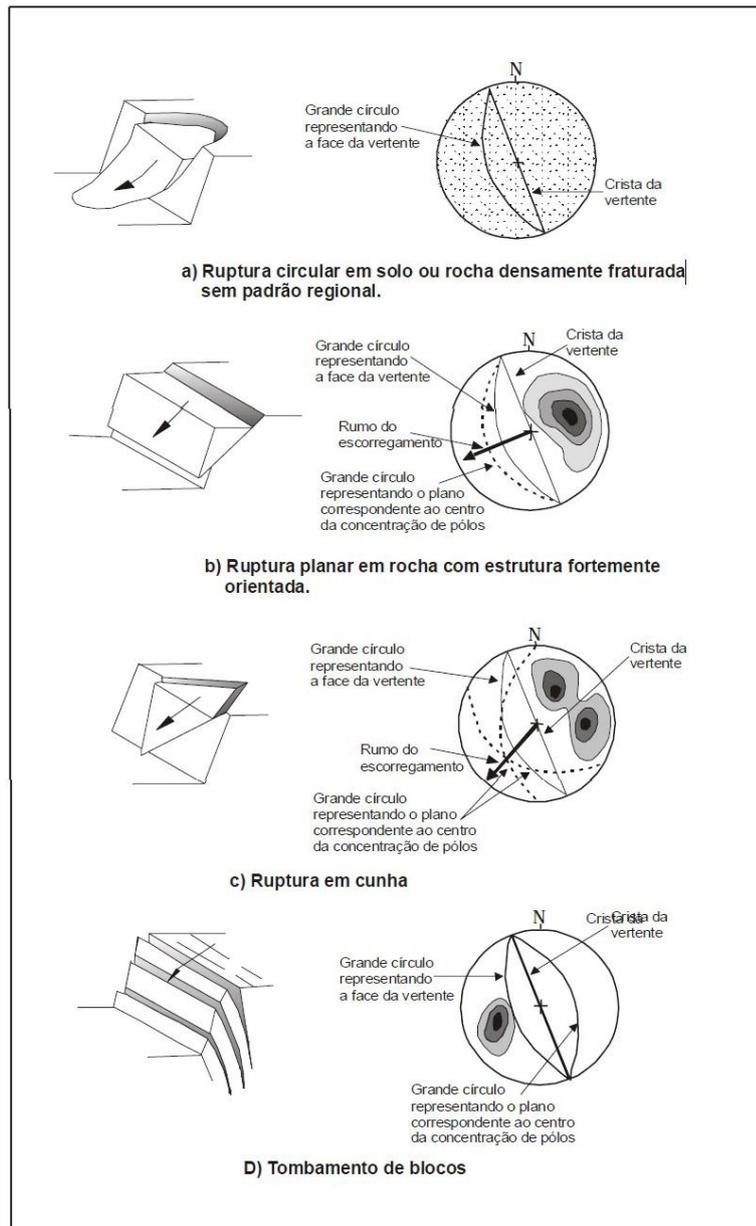
As rochas podem ser do tipo ígnea (vulcânica e plutônica), sedimentar e metamórfica, sendo que os processos de movimento de massa podem ocorrer em qualquer uma delas, de acordo com suas características. Importante, nos processos de movimentos de massa, é o grau de alteração das rochas, pois quanto mais alteradas, mais propensas ao processos de rolamentos, por exemplo.

As discontinuidades são quaisquer tipos de feições geológicas que interrompam a continuidade das rochas, como exemplo, delas, fraturas e falhas (ISRM, 1981). Nos maciços rochosos, elas podem ser as principais responsáveis pela instabilidade do talude, já que interferem de maneira expressiva na permeabilidade, deformidade e resistência. É comum, também, a ocorrência de diversas superfícies de discontinuidade, o que propicia variações bruscas nas propriedades físicas dos maciços (LOPES, 2006).

Para Hoek e Bray (1981), em massas rochosas, os valores mais baixos de coesão são encontrados ao longo das discontinuidades, sendo que a coesão pode chegar a zero e a resistência ao cisalhamento depender exclusivamente das características de atrito. Nummer

(2003) afirma que a estabilidade dos maciços rochosos é determinada, em grande parte, pelas descontinuidades geológicas, que podem condicionar diretamente o mecanismo e a geometria da ruptura, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Tipos de ruptura decorrentes da distribuição espacial das descontinuidades nos maciços rochosos.



Fonte: (HOEK E BRAY, 1981).

As descontinuidades, como fraturas e falhas, condicionam os fluxos de água, e consequentemente são fundamentais na abordagem da atuação da água na alteração do material

rochoso. Para Ramsay e Huber (1987), as fraturas são descontinuidades disjuntivas presentes nas rochas que podem ser denominadas de juntas ou de falhas. A distinção entre elas se dá pela magnitude do deslocamento relativo dos blocos isolados, visto que as falhas são fraturas que mostram um deslocamento superior a 5mm, enquanto nas juntas, o deslocamento dos blocos é inferior ao referido valor.

Com relação às rochas ígneas, podem ser destacadas as disjunções horizontais e verticais, nas sedimentares, os acamadamentos e laminações e nas metamórficas, as foliações, por exemplo. Essas características podem vir a favorecer os escorregamentos translacionais, tendo ainda que ser levadas em consideração as interferências de outros fatores, como fraturas e falhas, citadas anteriormente, que podem condicionar também os movimentos do tipo cunha, quedas e tombamentos.

O comportamento mecânico das rochas é altamente influenciado pela presença de heterogeneidades, tais como poros, e este fato é responsável pela degradação das propriedades mecânicas quando são aplicadas tensões externas (AUBERTIN e SIMON, 1997). Quanto à porosidade, pode-se dizer que o seu aumento é um indicador do processo de alteração, como o reflexo da velocidade de alteração ao longo do tempo. Isso faz relação com o fato de o aumento da porosidade e do índice de vazios favorecer a percolação de água na rocha e, conseqüentemente, a sua decomposição (LOPES, 2006).

Ainda neste sentido, destaca-se a permeabilidade, que é compreendida como a capacidade de um determinado material, sob condições normais, de permitir a passagem de água através de seus vazios. A permeabilidade dos materiais varia com o número de vazios contidos nele, e os principais fatores que influenciam no coeficiente de permeabilidade são: granulometria, índice de vazios, composição mineralógica, estruturas geológicas, fluido, macroestrutura e a temperatura (CAPUTO, 1973).

Os solos (seu comportamento) também podem estar envolvidos nos processos de movimentos de massa. Nesta tese, os solos serão tratados conforme conceitos utilizados na engenharia geotécnica e geologia de engenharia e, desta forma, são classificados conforme sua origem em: solos residuais e transportados (depósitos superficiais). Vários ramos do conhecimento estudam os solos, e, evidentemente, cada um acaba por ter uma abordagem diferenciada, sendo a intenção do presente estudo buscar questões que façam relação com a suscetibilidade a movimentos de massa, sendo inevitável apresentar alguns conceitos mais gerais e comuns a todas as ciências envolvidas, seja geografia, agronomia, geologia, geomorfologia, biologia, engenharia civil, entre outros ramos (MASSAD, 2016; LEPSCH, 2010).

Na classificação apresentada por Vargas (1977), os solos são divididos em quatro categorias, sendo elas: solos residuais; solos transportados; solos orgânicos e solos evoluídos pedologicamente. O referido autor apresenta, também, uma subdivisão que possui: solos jovens (saprólito) e maduros, pertencentes aos residuais; coluviões (tálus), aluviões (fluviais, litorâneos e deltaicos), sedimentos (quaternários, terciários) e eólicos (dunas), fazendo parte dos transportados; areias ou argilas orgânicas e turfas, sendo estes orgânicos; e solos porosos e lateritas, pertencentes aos evoluídos pedologicamente (VARGAS, 1977).

Para Lepsch (2010), os solos podem ser residuais, transportados ou de evolução pedogênica. Os solos residuais são originados do processo de intemperização de rochas pré-existentes, se localizando sobre a rocha que lhe deu origem, sendo que para que isso ocorra é necessário que a velocidade de decomposição da rocha seja maior do que a de remoção por parte dos agentes externos. Esses solos podem ser ainda subdivididos em solo residual maduro, jovem, saprolítico, de alteração e até mesmo rocha sã.

Na visão de Massad (2016), os solos coluvionares, tálus ou coluvião são encontrados na base das vertentes, podendo, por vezes, apresentar difícil distinção com relação aos contatos com o solo residual. Já os aluviões, se formam por meio do transporte de sedimentos a partir de grandes volumes de água. Como exemplo, tem-se os terraços fluviais das margens de rios; os de baixadas litorâneas; os leques aluviais dos deltas dos rios ou dos pés de morros próximos a planícies costeiras, entre outros.

Para Silveira (2003), a formação do solo coluvionar é um importante fato a ser analisado frente ao seu modo de ruptura. O movimento lento, mas quase contínuo, da massa de solo ao longo da vertente é alterado para um movimento mais acelerado, após períodos de chuvas intensas. Isso favorece a aceleração, já que a infiltração de água no interior desses taludes causa aumentos significativos de poropressão. Esses movimentos são responsáveis pela acomodação das camadas de solo coluvionar na vertente, no entanto, quando esse equilíbrio se rompe, o movimento rápido constitui o modo de ruptura do talude.

A camada de solo coluvionar é, normalmente, mais permeável do que os horizontes “A e B” do solo residual existente abaixo. Desta maneira, é comum se encontrar nessa camada níveis de água elevados que ajudam a reduzir a resistência ao cisalhamento dos materiais das camadas inferiores, além da formação de percolações adversas no solo coluvionar (DEERE e PATTON, 1971).

Silveira (2003) destaca ainda que quando há um movimento de massa, os solos localizados na superfície de cisalhamento principal ou até mesmo nas secundárias, formadas durante o processo de movimentação, perdem a estrutura, se transformando em um material

desagregado, perdendo suas características de origem. Mas é importante salientar que, em muitos casos, grande parte da massa movimentada é formada por blocos de dimensões variadas, que mantêm suas características normais. Desta forma, em um dado colúvio, pode haver resquícios das características do solo residual que lhe deu origem, o que tende a influenciar seus parâmetros de resistência ao cisalhamento.

A distinção do colúvio para o solo residual ou para o próprio substrato rochoso nem sempre é de fácil percepção. Uma importante característica a ser analisada nessa situação é a presença de uma linha de seixos, que evidenciaria a presença do colúvio (MACIEL FILHO e NUMMER, 2014).

### ➤ FATORES MORFOLÓGICOS

As formas do relevo são evidências da atuação de diferentes processos, tais como os geomorfológicos, geológicos, hidrológicos, ecológicos e pedológicos, que atuam ao longo do tempo (MACMILLAN; SHARY, 2009). Para a caracterização morfológica, são comumente utilizados parâmetros morfométricos como hipsometria, inclinações e formas das vertentes (HAMMOND, 1954; ARGENTO, 1994; BOTELHO, 1999; XAVIER DA SILVA, 2005; SILVEIRA, 2010) sendo, atualmente, atreladas com a utilização das técnicas de geoprocessamento em SIGs.

Também são utilizados atributos como declividade, plano e perfil de curvatura para caracterizar unidades morfológicas básicas, que auxiliam em uma série de mapeamentos temáticos (DIKAU, 1989; MOORE et al., 1991; SCCOTI, ROBAINA e TRENTIN, 2016). Assim, é pertinente tratar de alguns desses parâmetros especificamente.

Pode-se dizer que a hipsometria é o parâmetro inicial dentro do contexto das análises dos agentes morfológicos. O modelo numérico do terreno (MNT) ou modelo digital de elevação (MDE), é uma imagem em que cada *pixel* possui o valor Z de altitude correspondente as suas coordenadas X e Y, e esses modelos podem ser gerados a partir das curvas de nível com a utilização de *software* especializado, ou serem baixados diretamente de *sites* de instituições específicas, como no caso de imagens SRTM e ASTER. Essas questões serão mais bem discutidas em subtítulos posteriores específicos. A partir dessa base de dados, é possível obter uma representação muito próxima da topografia existente na área de estudo, sendo possível possuir, também, uma visão tridimensional de toda formação do relevo local (PADILHA, 2008).

A carta de declividade representa quantitativamente o comportamento espacial do relevo, e possui uma série de aplicações, especialmente em áreas como as de geomorfologia, hidrologia, engenharia, atividades militares e planejamento territorial. O principal motivo disso é o fato de que a inclinação do terreno tem influência direta nas taxas de escoamento superficial das águas da chuva, nos processos de erosão do solo, no assoreamento de rios e na ocorrência de inundações, bem como no fluxo de pessoas e veículos nas ruas e estradas (KOFFLER, 1994).

A declividade influencia de forma crucial na concentração, dispersão e velocidade da atuação da água, e, conseqüentemente, no maior ou menor arraste de partículas de solo. Desta forma, quanto maior a declividade, maior a velocidade de escoamento, menor a infiltração e, assim, comumente, menor a espessura do solo, devido, principalmente, ao maior transporte de solo (se comparado a um solo bastante semelhante, com fatores próximos, diferenciando apenas a declividade) (LEPSCH, 2010). Conforme Teixeira (2005) e Bateira (2001), as vertentes com maiores declividades são as mais suscetíveis ao desenvolvimento de movimentos massa, visto que o fator gravidade se apresenta como um componente essencial nestes processos.

No entanto, é sempre importante lembrar que os fatores atuam em conjunto, assim, além da análise da precipitação, relacionando seu volume, intensidade, duração e frequência, há de se atentar para o processo de infiltração, que é intrínseco ao tipo de geologia, solo, geomorfologia, uso, entre uma série de outras questões locais. Assim, ter a declividade como fator decisivo para a movimentação de massa é uma avaliação superficial (IPT, 1980).

Via de regra, as classes de declividade são dadas em percentagem ou grau. Por vezes, são apresentadas as equivalências, ou seja, a declividade nas duas formas para evitar confusões nas análises. A declividade do terreno está entre os principais fatores de decisão na análise de projetos de parcelamento do solo urbano, e a ocupação de encostas ainda é um assunto controverso no âmbito municipal, principalmente pelo fato da forte ocorrência de desastres naturais, que comumente gera vítimas e danos materiais à sociedade (BITAR, FREITAS e FERREIRA, 2012).

As declividades elevadas são normalmente relacionadas com a viabilidade ou não da ocupação. Na legislação urbanística, por exemplo, as normas que dispõem sobre o parcelamento do solo urbano têm como referência a inclinação de 17°, que é equivalente à 30%. Acima desse valor, uma avaliação geotécnica é requerida, junto ao atendimento de exigências específicas. Já para a legislação ambiental, é vedada a ocupação de terrenos com inclinação superior a 45°, equivalente a 100%, tanto em áreas urbanas quanto rurais, sendo restrita a 25° (47%). Ainda neste sentido, a combinação das duas normas federais define a possibilidade de ocupação até 45° (100%) (BITAR, FREITAS e FERREIRA, 2012).

A inclinação de 30° (58%) é o patamar acima do qual os movimentos ocorrem com frequência significativamente maior. Ao conjugar normas federais, levando em consideração áreas urbanas e incluindo o conhecimento geotécnico, pode-se distinguir as seguintes classes e respectivas recomendações gerais: até 30% (17°), em que a ocupação deve depender de medidas básicas usuais a adotar; entre 30 e 47% (17° e 25°), em que a ocupação deve estar condicionada à realização de medidas resultantes de estudos detalhados; entre 47 e 58% (25° e 30°), em que a ocupação deve ser condicionada a medidas especiais advindas de detalhamento ainda maior; entre 58 e 100% (30° e 45°), em que a ocupação deve ser evitada, podendo ser admitida em casos excepcionais, mediante soluções fundamentadas em estudos adequados a obras para situações de perigo ou risco extremo; acima de 100%, em que, além do impedimento legal, deve-se revisar eventuais ocupações existentes, em razão da complexidade inerente e de possíveis interações adicionais (como exemplo as cabeceiras de drenagem, nascentes d'água, escarpas e outras) (BITAR, FREITAS e FERREIRA, 2012).

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT, adota as classes de declividade de <5% e 5-15%, em que: <5% são áreas de baixa declividade e onde comumente se registram processos deposicionais e entre 5 e 15%, que é a faixa que define o limite máximo para o emprego da mecanização na agricultura, além de ser caracterizada como áreas propícias à ocorrência de processos de movimentos de massa e escorregamentos. A partir desta inclinação, ou seja > 15%, o processo erosivo começa a ser mais significativo (SCHIRMER e TRENTIN, 2013).

Herz e De Biase (1989) sugerem uma classificação com um volume maior de classes, sendo elas: 15 a 30%, em que é definido por Legislação Federal - Lei 6766 (também chamada de Lei Lemann) o limite máximo para urbanização sem restrições, a partir do qual toda e qualquer forma de parcelamento deve ser realizada por meio de exigências específicas; 30 a 47%, definido pelo Código Florestal como limite máximo de corte raso, a partir do qual a exploração só será permitida se sustentada por cobertura de florestas Lei 4771/65; >47%, em que o Código Florestal prevê que não seja permitida a derrubada de florestas, só sendo tolerada a extração de toras quando em regime de utilização racional que vise a rendimentos permanentes.

Por fim, Silveira e Cunha (2006) ainda trazem outra abordagem, o que mostra que as classes de declividade podem variar de acordo com o objetivo da pesquisa realizada. Conforme os referidos autores, são apresentadas: < 2% para áreas suscetíveis à inundação; entre 2% e 5% e a partir de 5% em que é possível a urbanização sem restrições quanto à possibilidade de inundação; entre 5% e 12% com terrenos onde é possível a urbanização e a mecanização

agrícola; entre 12% e 20% em que há restrições à mecanização agrícola; entre 20% e 30% caracterizada pela permissão da urbanização e acima de 30%, com área inadequada para a urbanização.

A declividade comumente gera resultados bastante confiáveis quando se tem uma boa base de dados, excluindo aqui, também, a possibilidade de erros gerados pelo próprio usuário. No entanto, para Fernandes et al. (2001), a declividade vem sendo utilizada como o principal, ou mesmo o único parâmetro de caráter topográfico incorporado aos estudos de predição e definição de áreas suscetíveis a movimentos de massa, o que vem gerando, por muitas vezes, distorções nas análises. Isso se deve ao fato de que, em algumas situações, áreas de menor declividade são definidas como de baixa suscetibilidade, mas acabam apresentando, com frequência, cicatrizes no campo, principalmente na forma de fluxo de detritos, o que acaba por conflitar com o que era esperado, gerando interpretações dúbias na pesquisa (SILVEIRA et al., 2014). Desta maneira, deve-se associar a avaliação da declividade com parâmetros como a forma de perfil e plano de curvatura das vertentes, visando a melhor compreensão das características frente a suscetibilidade a movimentos de massa.

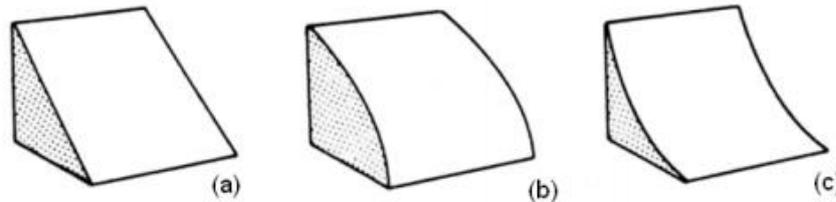
São muitas as formas de vertentes, e é bastante evidente que não há a possibilidade de representar todas as que são encontradas na natureza. Quando se observa um desenho, croqui, esquema, etc., há de se ter em mente que na prática, no campo, as representações nunca serão tão claras como se vê nos livros. No entanto, para representar as vertentes, utiliza-se a linha de maior declive, simplificando-as em modelos, de acordo com o perfil e plano de curvatura, que são duas formas de se avaliar as vertentes. Conforme Neto (2013), a análise desses parâmetros vem a colaborar com respostas a questões relativas à concentração e acúmulo de escoamento superficial e suas consequências, como, por exemplo, a maior suscetibilidade a processos erosivos.

O perfil de curvatura é a taxa de variação do gradiente de arqueamento na direção de sua orientação, culminando na classificação do caráter convexo/côncavo do terreno e sendo de fundamental importância na aceleração ou desaceleração do fluxo da água no terreno, como pode ser observado na Figura 10 (SCCOTI, ROBAINA e TRENTIN, 2016).

Neste contexto, a convexidade da vertente é a área que possui declives crescentes, predominando a infiltração, o segmento de vertente é a área em que os declives são maiores e permanecem constantes na medida do possível. Quando o segmento possui inclinação maior de 45° são considerados escarpas, onde pela alta declividade, quase não há solo, e os fragmentos que se desprendem do maciço rochoso caem. Por outro lado, a concavidade da vertente é a área que passa a apresentar declives decrescentes. Salienta-se que uma vertente pode não apresentar

segmento retilíneo, passando da convexidade para a concavidade, ou mesmo apresentar extensos segmentos e pequenas convexidades e concavidades (MACIEL FILHO e NUMMER, 2014).

Figura 10 - Tipos de vertentes em relação ao perfil.



a) retilínea b) convexa c) côncava  
 Fonte: (SCHMIDT E HEWITT, 2004).

Ainda com relação às formas da vertente, cabe destacar as classes de curvaturas horizontais. O plano de curvatura da vertente corresponde a variação do gradiente de arqueamento na direção ortogonal da vertente, fazendo menção ao caráter divergente/convergente do terreno (SCCOTI, ROBAINA e TRENTIN, 2016).

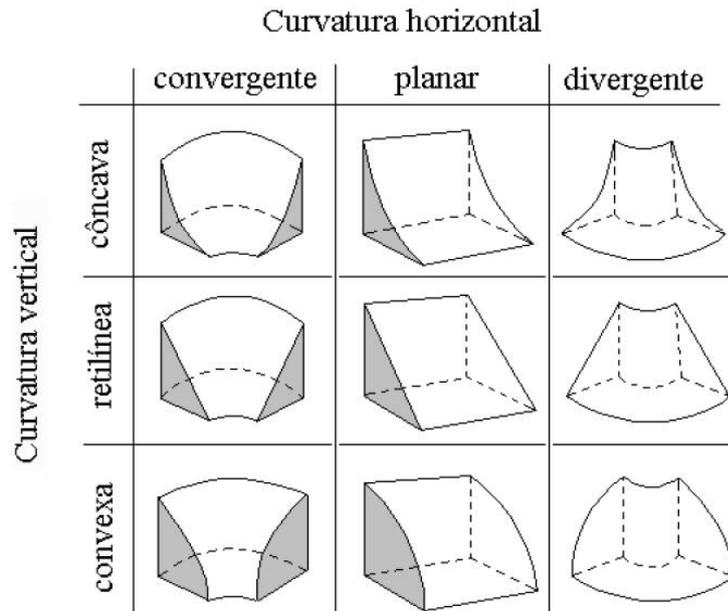
O mapeamento do plano de curvatura dá uma percepção da curvatura horizontal do terreno e permite a distinção entre a exposição aberta (divergente) ou em anfiteatro (convergente). Esta variável, será pertinente pois colabora com a compreensão da intensidade dos processos de migração e acúmulo de água. Assim como a análise em perfil, o plano de curvatura desempenha papel importante sobre o balanço hídrico e o equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese (VALERIANO, 2008a).

Percebe-se que para se assemelhar mais à realidade, pode-se associar o perfil ao plano de curvatura da vertente, o que culminaria em associações, como uma vertente côncava-convergente, côncava-planar, retilínea-planar (pouco provável na natureza), convexa-divergente, entre outras, como pode ser visto na Figura 11.

Neto (2013) fez uma interessante leitura de Valeriano (2008a), tratando basicamente da combinação do perfil e plano de curvatura. Neste contexto, ele destaca a forma do terreno côncava-convergente como a classe com maior concentração e acúmulo de escoamento superficial, que, como consequência, também se trataria da classe com maior vulnerabilidade aos processos erosivos mais intensos. Dentro desta leitura, Neto (2013) ainda elaborou uma adaptação de uma figura originalmente de Valeriano (2008a), acrescentando características

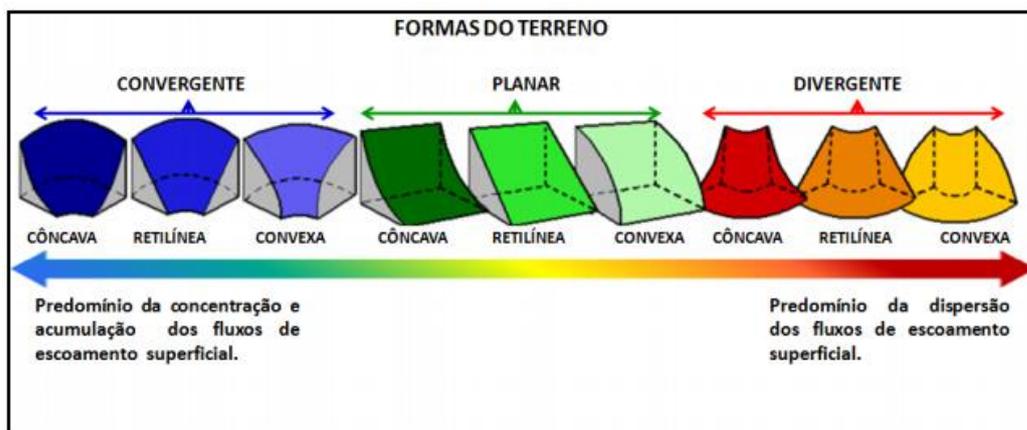
relativas a concentração e dispersão dos fluxos de escoamento superficial, conforme a Figura 12.

Figura 11 - Combinação das curvaturas para caracterização das formas da vertente.



Fonte: (VALERIANO, 2008).

Figura 12 - Formas do terreno e suas relações frente ao fluxo de escoamento superficial.



Fonte: (NETO, 2013).

Seguindo este raciocínio, no outro extremo encontram-se as formas do terreno convexas-divergentes, que são a classe com maior dispersão do escoamento superficial, logo

possuem a menor concentração e acúmulo de água. Neste caso, tem-se a presença de formas do terreno onde o escoamento superficial possui baixa capacidade de transporte e remoção das partículas do solo, logo apresentam baixa vulnerabilidade à perda de solos (NETO, 2013).

Nota-se a relevância dessas características frente a dinâmica das águas, visto que dependendo da combinação existente tem-se atividades bastante distintas, interferindo na dinâmica do ambiente e, conseqüentemente, em um possível movimento de massa. Por exemplo, ao combinar a curvatura horizontal divergente com a vertical convexa, tem-se certa dinâmica da água que será bastante discrepante de uma combinação de uma curvatura convergente/côncava, em que basicamente ter-se-ia uma concentração do fluxo superficial de água bastante superior.

A orientação de vertente é também chamada de exposição, direção ou aspecto e é definida como o ângulo azimutal correspondente a maior inclinação do terreno, sendo expressa em graus, de 0° a 360°. A orientação de vertente é outro fator importante, sendo que em áreas situadas abaixo do trópico de capricórnio, como os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, percebe-se que as faces das montanhas voltadas ao norte são mais quentes e mais secas quando comparadas às voltadas ao sul, isso, simplesmente, pelo fato de receberem mais energia do sol. Por este fato, os solos dessas encostas são, frequentemente, mais rasos e, conseqüentemente, com horizontes menos desenvolvidos que as vertentes voltadas ao sul (LEPSCH, 2010).

Pike e Sobieszczyk (2008) apresentam um trabalho bastante relevante sobre suscetibilidade a movimento de massa em que a orientação de vertente é fortemente explorada, além da relação com outros fatores como a precipitação (mais especificamente, as tempestades) e a vegetação. No referido artigo, a direção do vento é analisada, juntamente com o alinhamento do terreno, sendo citados como fatores chave na distribuição azimutal do início dos movimentos, que neste caso se refere ao fluxo de detritos.

Algumas zonas são mais carentes com relação à energia solar, como as de latitudes extratropicais. Nestas, a análise da orientação de vertente é de fundamental importância, visto que a orientação relativa ao sol irá definir as vertentes mais aquecidas e secas, das mais frias e úmidas. No caso do hemisfério Sul, as vertentes mais quentes serão as voltadas ao norte, pelo fato de, nesse hemisfério, o sol estar sempre no horizonte norte, ficando as vertentes voltadas ao horizonte sul à sombra (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

## ➤ FATORES HIDROLÓGICOS

A importância dos fatores hidrológicos está relacionada a sua interferência na dinâmica das vertentes, como a drenagem, o escoamento superficial, o transporte de sedimentos, redução da resistência ao cisalhamento, poropressão, sucção etc. Assim, já é consagrado que a atuação da água é um ponto de muita relevância na análise dos movimentos de massa, pois se a presença no interior de um maciço rochoso ou terroso gera um aumento de poropressão, e conseqüente redução da resistência ao cisalhamento, favorece a ruptura. A água, também, eleva o peso de todo o material (solo, rocha alterada, rocha) que se localiza sobre a superfície de ruptura, contribuindo ainda mais para este processo (AHRENDT, 2005).

Durante as chuvas, ou até mesmo após, o nível freático ou piezométrico sobe, aumentando a pressão no maciço, que é onde se encontra o talude de um corte ou aterro. Em materiais porosos, como aterros, solos e algumas rochas sedimentares, o volume de vazios por unidade de volume é relativamente grande, neste caso, esse material poderá absorver um volume relativamente grande de água sem elevar tanto o nível. Por outro lado, em materiais rochosos fraturados, em que a porosidade é ínfima, a água se acumula nas fraturas, que normalmente não oferecem um grande volume por unidade de volume do maciço. Assim, nesta situação, ao receber a água da chuva, ocorre uma subida rápida do nível piezométrico (MACIEL FILHO e NUMMER, 2014).

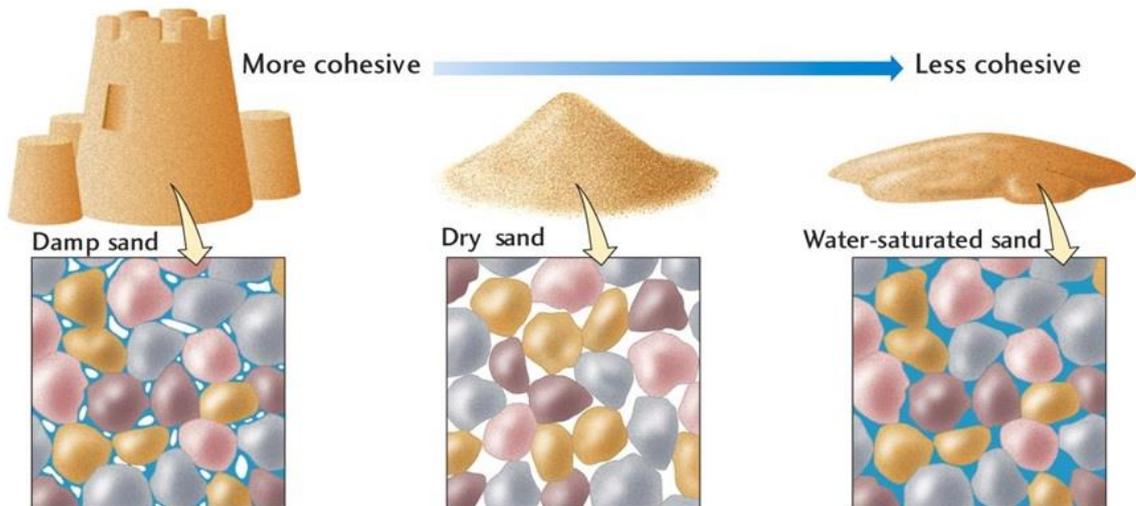
Cunha e Guerra (2008) relacionam a influência da água nas movimentações da vertente aos fluxos, ao comentar que os fluxos de detritos são movimentos rápidos onde os materiais se comportam como fluidos altamente viscosos, sendo associado com a grande concentração de água superficial. Neste movimento, a parte argilosa do material se mistura com a água formando um líquido viscoso (lama), com alta plasticidade que flui para as partes baixas das vertentes.

Para melhor compreender a coesão do material, usualmente expõe-se a atuação da água em contato com a areia, de acordo com a Figura 13. Percebe-se que, até certo ponto, a água colabora com a coesão do material, tornando-o mais coeso do que quando se apresenta seco. A partir de determinada quantidade, a areia volta a perder a coesão, como no caso em que a areia se encontra saturada. Desta maneira, a tensão superficial numa areia úmida liga as partículas, de modo que elas resistam mais ao movimento. As partículas secas são ligadas somente pelas suas formas e pelo atrito entre as massas. Já as saturadas são separadas pela água, a qual mantém os grãos separados e também atua como lubrificante, permitindo que elas fluam.

A velocidade de infiltração não é explicada apenas pelas características do solo, a atividade animal, a vegetação e o clima interferem fortemente nesta questão. Colaborando com

este fato, um mesmo tipo de perfil de solo e até mesmo a posição da vertente afetam significativamente a velocidade de infiltração (EVANS et al., 1998; LOAGUE e GANDER, 1990).

Figura 13 - Figura da sucção e poropressão, diferenças na coesão da areia em contato com a água.



Fonte: <http://file.scirp.org/Html/3-1110069/b7aabb13-2e8d-4ebb-a91b-dd5a344b2f53.jpg>

Há de se destacar a diferença da ação da água em rochas sedimentares (poros) e em rochas “duras”, ígneas e metamórficas, fraturadas. A porosidade característica de rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados é também conhecida como porosidade intergranular (KARMANN, 2000). Desta forma, essa porosidade depende de alguns fatores para poder conter maiores ou menores quantidades de água, variando entre 10 e 40 %. Quanto maior o tamanho dos grãos e menor o seu empacotamento (compactação), maior é o espaço existente entre eles, por outro lado, quanto menores as partículas e maior a cimentação entre elas, menor é o espaço para ser preenchido por água (PRESS, 2006).

Em rochas ígneas e metamórficas, fundamentalmente, ocorrem fraturas onde a água pode ficar armazenada. A porosidade, nesse caso, é bastante inferior ao comentado sobre as rochas sedimentares, no caso da porosidade intergranular, variando de 1 a 2%. Esse tipo de porosidade é conhecido como porosidade de fraturas (PRESS, 2006).

Tão importante quanto a porosidade de um material terrestre, é a sua permeabilidade. Apesar de alguns materiais conterem poros de tamanhos consideráveis, se não houver uma intercomunicação desses poros, a água fica impossibilitada de circular dentro do material. A

capacidade de um material de conduzir um fluido através de seus poros é conhecida como permeabilidade. Comumente, a permeabilidade aumenta com a porosidade, mas em alguns casos, como nas argilas, pode haver até 50% de porosidade, sendo que a permeabilidade quase que inexiste. Essa situação ocorre devido ao tamanho diminuto dos poros onde a água fica presa por absorção (KARMANN, 2000).

### ➤ FATORES ANTRÓPICOS

Com relação aos fatores antrópicos, serão levadas em consideração as ações humanas, e como isso interfere no uso e ocupação da terra. Como exemplo, em cortes na vertente para o estabelecimento de estradas, a supressão de vegetação, a exposição do solo, entre outras questões e suas consequências.

Um exemplo bastante pertinente da ação antrópica, dentro deste contexto, é o estabelecimento de estradas a partir de cortes na vertente. A presença da rodovia modifica os padrões naturais de fluxo d'água, e as águas que surgem nos cortes em rocha são geralmente mal drenadas e infiltram-se nas camadas granulares do aterro do corpo estradal. A ausência de um sistema de drenagem de pista em diversos locais permite que o fluxo se dê pela base do aterro, ou por vezes pelo subleito do pavimento, surgindo na crista ou na base das vertentes. Esses fenômenos resultam em aumento de poropressões ou mesmo em processos erosivos, como o *piping*, que promovem subsidências ao longo da estrada (VANACÔR e ROLIM, 2012).

Dentro do fator antrópico, destaca-se a alteração da vegetação, pois a sua presença ou supressão está diretamente relacionada a esta questão. A vegetação influencia de diferentes maneiras as movimentações de vertente. Como exemplo, a vegetação previne a erosão, devido à ação das raízes das árvores, que aumentam a resistência do solo (VANACÔR e ROLIM, 2012). A atuação da cobertura vegetal na estabilidade de vertentes se dá no sentido de reduzir a intensidade dos agentes climáticos na vertente, favorecendo desta maneira a estabilidade (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Conforme Gray (1995), a cobertura vegetal apresenta comportamentos diferenciados quanto à estabilidade das vertentes, podendo ser favoráveis e desfavoráveis. A vegetação atua basicamente de duas formas, sendo uma delas positiva e outra negativa. No primeiro caso, pode-se dizer que a vegetação favorece a infiltração, visto que a existência das raízes abre caminho para que este fato ocorra, reduzindo assim o escoamento superficial e a conseqüente erosão e/ou lixiviação. Também favorece a estabilidade da vertente devido a qualidade de coesão que as raízes dão ao solo, podendo evitar a movimentação da massa.

Por outro lado, apesar dessa característica bastante marcante, a vegetação não deve ser vista sempre como algo positivo frente a estabilização da vertente, pois em alguns casos ela pode não ser benéfica, e vir a favorecer o movimento de massa. Como exemplo disso, tem-se a atuação da vegetação como alavanca, em que uma árvore (que pode até mesmo se apresentar isolada) está localizada em um ponto crítico, e com a influência dos ventos (comuns em grandes precipitações) vem a ceder, e devido a atuação de suas raízes, comentada anteriormente, tende a levar consigo a porção de solo existente ao redor, favorecendo assim a movimentação da vertente (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2009).

Rickson (1995) destaca, entre os efeitos favoráveis, a redistribuição da água da chuva nas copas das árvores, o que vem a impedir o impacto direto da chuva na superfície do terreno, retardando e diminuindo a quantidade de água que se infiltra no solo, e o aumento da resistência do solo devido ao reforço mecânico produzido por raízes pivotantes e profundas. Já os efeitos desfavoráveis destacado pelo autor podem ser descritos como o efeito alavanca, que é a força cisalhante transferida pelos troncos das árvores ao terreno, quando suas copas são atingidas por fortes ventos; efeito cunha, originado pela pressão lateral causada pelas raízes ao penetrar em fendas, fissuras e canais de solo ou rocha; e a sobrecarga vertical, causada pelo peso das árvores, principalmente em vertentes com alta declividade.

Varnes (1984) também destaca, como efeitos negativos da vegetação na estabilidade das vertentes, o aumento da sobrecarga vertical nos taludes, o aumento da ação da força dos ventos nas árvores causando um momento de tensões cisalhantes na superfície de ruptura e a desagregação do solo por meio da ação das raízes que dilatam as trincas e favorecem a infiltração.

Prandini et al. (1976) destacam que a vegetação promove estabilidade, pois reduz a ação dos agentes climáticos, protegendo o solo das precipitações, vento e irradiação solar; reter uma umidade razoável de água da chuva e eliminar água por meio de evapotranspiração; diminuir o escoamento superficial e a erosão e aumentar a resistência ao cisalhamento no talude pela ação das raízes. Para Santos (2004) a vegetação natural como o único fator externo inibidor dos escorregamentos e de todas as formas de movimentação superficial dos terrenos, e isso se deve ao fato de impedir a ação direta das gotas de chuva no solo pela atuação das copas e da serrapilheira; reter, por molhamento de todo o edifício arbóreo, parte da água da chuva que chegaria ao solo; diluir no tempo o acesso das chuvas ao solo; retirar por absorção e devolver à atmosfera por evapotranspiração parte da água infiltrada no solo e agregar, “coesionar” e reter os solos superficiais por meio de uma malha superficial e subsuperficial de raízes.

Bateira (2001) salienta que nem sempre a presença do homem é passiva, apresentando, em muitos casos, uma intervenção acentuada, alterando as condições naturais frente à ocorrência dos processos geomorfológicos da evolução das vertentes, sendo estes agravados. Como exemplo desta situação, pode-se citar que sob condições naturais presencia-se a ocorrência de fluxos de detritos em áreas de altas declividades, como as maiores que 30°, e em mantos de alteração com textura grosseira, com a intervenção humana, pode-se observar este processo com início em declividades menores. O autor destaca que a abertura de trincheiras na base da vertente é uma das práticas que, frequentemente, afeta a dinâmica da encosta, concluindo que mesmo em locais onde os fatores de ordem natural são favoráveis à ocorrência de processos de instabilidade, muitas vezes é a intervenção antrópica que vai desencadear o processo ou até mesmo transformá-lo numa catástrofe. Assim, interferências de origem antrópica poderão provocar a perda de coesão dos materiais e tornar terrenos compactos em desagregados, logo, suscetíveis à movimentação.

### 2.3 MODELOS DE SUSCETIBILIDADE E EXEMPLOS DE ESTUDOS DE CASO

Diante do avanço da tecnologia, o uso de *softwares* como os voltados ao geoprocessamento são de grande valia, principalmente quando levados em consideração a agilidade dos procedimentos e o baixo custo. Neste item, serão apresentadas metodologias de avaliação da suscetibilidade com o uso de SIG e exemplos de caso desenvolvidos por alguns pesquisadores nacionais e internacionais. Os estudos de caso serviram de base para a escolha das variáveis que foram utilizadas no modelo desenvolvido nesta pesquisa.

#### 2.3.1 Metodologias de avaliação da suscetibilidade com uso de Sistemas de Informações Geográficas

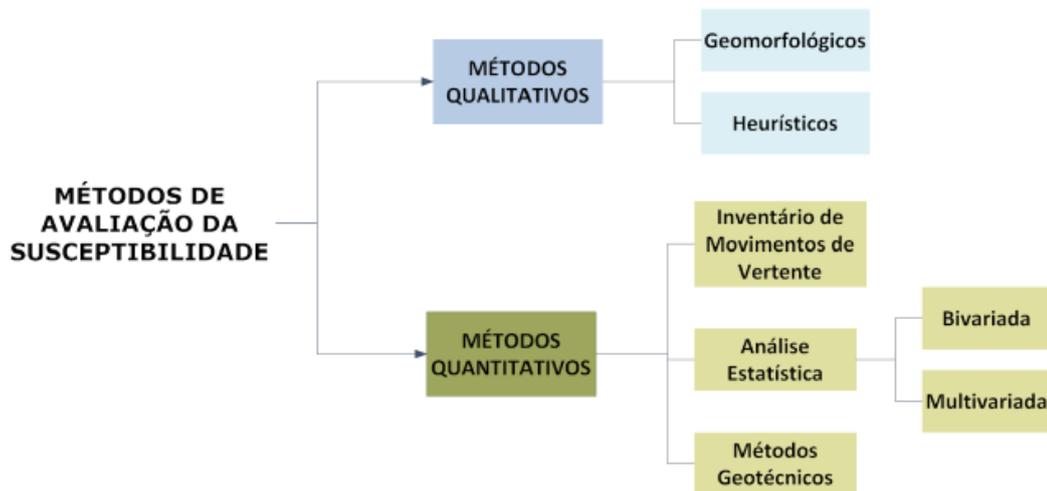
Os métodos para hierarquizar os fatores de instabilidade a movimentos de massa e atribuir diferentes níveis de suscetibilidade podem ser qualitativos ou quantitativos e diretos ou indiretos. Os métodos qualitativos são subjetivos e a classificação de suscetibilidade é realizada em termos descritivos, já os métodos quantitativos produzem estimativas numéricas, que muitas vezes são utilizadas para análises de suscetibilidade de ocorrência de movimentos de massa numa determinada área de estudo (GUZZETTI et al., 1999).

Nesses tipos de análise, comumente, inicia-se com a identificação e inventário dos movimentos de massa, seguindo-se com a identificação e cartografia de uma série de fatores

que estão direta ou indiretamente relacionados com a instabilidade das vertentes. Em seguida, estima-se a contribuição de cada fator para a instabilidade das vertentes e classifica-se a área segundo diferentes graus de suscetibilidade (GUZZETTI et al., 1999).

Os principais métodos de avaliação de suscetibilidade a movimentos de massa podem ser agrupados em diferentes categorias, dependendo de suas especificidades (Figura 14): métodos qualitativos (geomorfológicos e heurísticos) e quantitativos (inventário de movimentos de massa, análise estatística e geotécnicos).

Figura 14 - Classificação dos métodos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa.



Fonte: (PEREIRA, 2009).

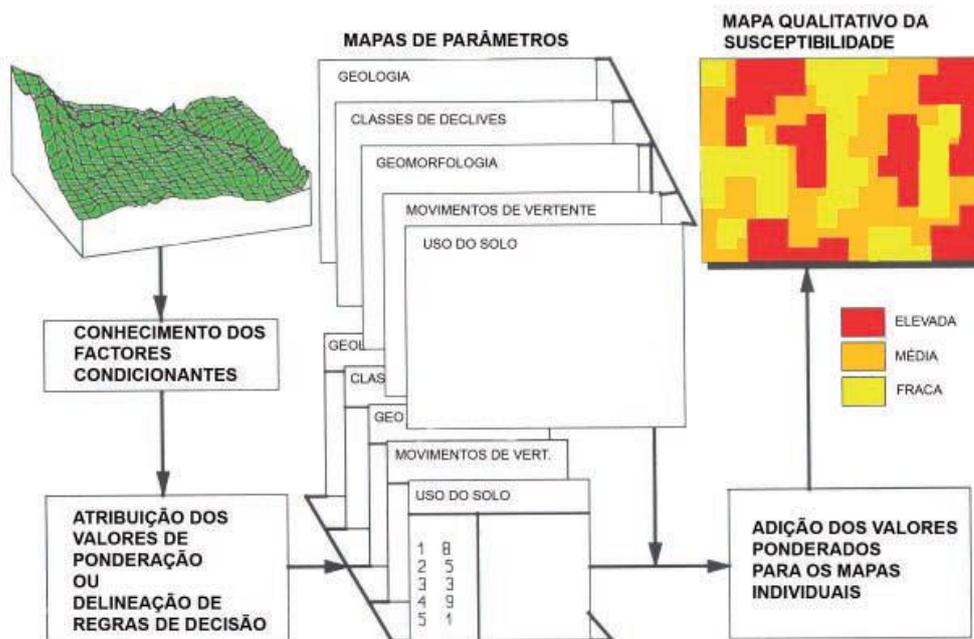
Os métodos qualitativos compreendem os Geomorfológicos e os Heurísticos. O método geomorfológico é um procedimento qualitativo e direto, que se assenta na experiência do investigador e no trabalho de campo para estimar as instabilidades de vertentes (SOETERS e VAN WESTEN, 1996; PANIZZA, 1996; ZÊZERE, 1997; BATEIRA, 2001). Desta forma a classificação é realizada diretamente no campo pelo pesquisador, sem uma clara indicação de regras orientadoras da avaliação. Não raro os mapas de suscetibilidade a movimentos de massa em vertentes derivam diretamente dos mapas geomorfológicos detalhados de campo (SOETERS E VAN WESTEN, 1996). Os métodos geomorfológicos podem ser usados em qualquer escala e permitem adaptação a requisitos locais. A análise geomorfológica no campo não requer a utilização de um SIG, podendo ficar restrita a uma simples ferramenta de desenho (ALEOTTI E CHOWDHURY, 1999).

O método heurístico surge também como uma abordagem um pouco mais genérica, que tem como principal vantagem o fato de ser aplicável a praticamente qualquer área, se baseado no conhecimento assumido das causas e fatores de instabilidade de vertentes (PEREIRA, 2009a).

Conforme Soeters e Van Westen (1996) estes métodos são indiretos e qualitativos, sendo dependente do nível de compreensão do investigador sobre os processos geomorfológicos presentes no terreno. Os fatores de instabilidade são hierarquizados e ponderados de acordo com a importância atribuída pelo investigador, frente à possibilidade de causarem movimentos de massa.

Assim, os principais passos para o desenvolvimento do método heurístico são: subdivisão de cada parâmetro num número de classes relevante; atribuição de um valor de ponderação a cada classe; atribuição de valores ponderados a cada um dos parâmetros; sobreposição dos mapas ponderados e desenvolvimento do mapa final com a apresentação das classes de suscetibilidade (SOETERS e VAN WESTEN, 1996). Como exemplificação das etapas dessa metodologia, tem-se a Figura 15.

Figura 15 - Esquema da análise do método heurístico de movimentos de massa em SIG



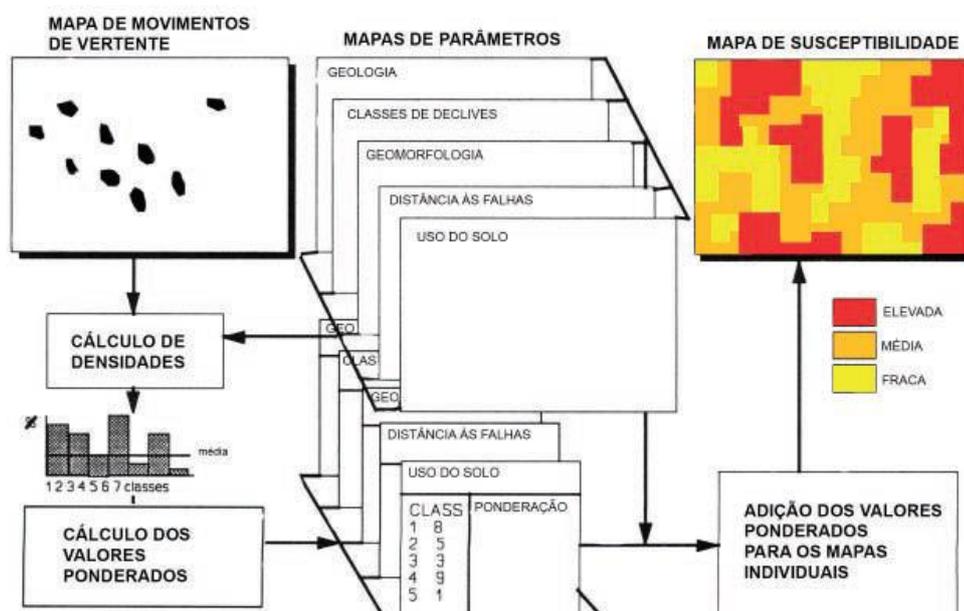
Fonte: (PEREIRA, 2009).

Os métodos quantitativos são compostos por inventário de movimentos de massa, análise estatística e métodos geotécnicos, como destacado previamente. Neste sentido, o inventário de movimentos de massa é uma base de trabalho para a aplicação de outras metodologias para predição de áreas suscetíveis, se tratando, também, de um método indireto além de quantitativo (PEREIRA, 2009a). Macedo e Bressani (2013) destacam que um mapa que apresente um inventário de movimentos de massa, com localização e área, é bastante positivo para a pesquisa.

Os métodos estatísticos se fazem importantes, pois introduzem uma avaliação quantitativa e objetiva da suscetibilidade a movimentos de massa e a possibilidade de validação da importância de cada fator condicionante, bem como do próprio modelo preditivo, tirando parte de subjetividade da análise (PEREIRA, 2009a).

No referido método, são presentes as seguintes etapas, de acordo com Aleotti e Chowdhury (1999), Soeters e Van Westen (1996) e Remondo et al. (2003), apresentadas na Figura 16:

Figura 16 - Esquema da análise estatística bivariada de movimentos de massa em SIG.



Fonte: (PEREIRA, 2009).

1 - Seleção e cartografia dos parâmetros significativos e a sua divisão em classes relevantes;

2 - Cartografia dos movimentos de massa devidamente georreferenciados;

3 - Sobreposição do mapa de movimentos de massa do tipo “x” com cada mapa de parâmetros;

4 - Determinação da densidade de movimentos de massa para cada classe dos parâmetros e definição dos valores ponderados;

5 - Estimação dos valores por meio de relações bivariadas entre o mapa dos movimentos de massa e os mapas temáticos dos fatores condicionantes, para se obter os valores de suscetibilidade para cada variável, com base na equação da função de favorabilidade;

6 - Integração dos fatores de instabilidade por sobreposição dos mapas;

7 - Cálculo final do valor de suscetibilidade de cada unidade de terreno identificada.

Na análise estatística bivariada podem ser considerados vários parâmetros como litologia, declividade, plano e perfil de curvatura, orientação de vertente, pedologia, uso do solo, distância de estradas, densidade de drenagem, morfologia, proximidade a cursos d’água, entre outros (ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999).

Dentro da análise estatística bivariada, podem ser utilizados diversos métodos estatísticos para calcular os valores ponderados, como por exemplo o método do Valor Informativo, que pode ser aplicado em software de SIG com pacotes de análise estatística e que vem apresentado bons resultados para movimentos de massa como os utilizados na presente pesquisa (ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999; SÜZEN e DOYURAN, 2003).

O Valor Informativo (*information value method*) é um método proposto por Yin e Yan (1988) e aplicado por Zêzere (1997) na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa na região a norte de Lisboa. Este método implica a definição prévia de unidades de terreno e a consideração de um conjunto de fatores de instabilidade. Para cada uma das classes de cada variável é determinado o respectivo Valor Informativo, a partir da relação:

$$li = \log \frac{Si/Ni}{S/N} \quad (1)$$

Em que:

$I_i$  = Valor Informativo da variável  $i$ ;

$S_i$  = número de unidades de terreno com movimentos de tipo  $y$  e com a presença da variável  $x_i$ ;

$N_i$  = número de unidades de terreno com a presença da variável  $x_i$ ;

$S$  = número total de unidades de terreno com movimentos de tipo  $y$ ;

$N$  = número total de unidades de terreno.

Desta forma, quando o valor de  $I_i$  é negativo, considera-se que a variável em questão não é determinante no desenvolvimento do movimento de massa em questão, ao passo que os resultados positivos indicam uma relação entre a presença da variável e as manifestações de instabilidade, tanto mais acentuada quanto maior for o *score*. O valor informativo total de uma unidade de terreno  $j$  é determinado por (ZÊZERE, 1997):

$$I_j = \sum_{i=1}^m X_{ji} I_i \quad (2)$$

Em que:

$m$  = número de variáveis;

$X_{ji}$  = se a variável está ausente na unidade de terreno tem o valor 0, e 1 na situação oposta.

A suscetibilidade das unidades de terreno à ocorrência de um certo tipo de movimento de massa varia na relação direta do respectivo valor de informação total,  $I_j$ . A aplicação do método do Valor Informativo para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa segue os seguintes passos: definição das unidades de terreno a partir do cruzamento das variáveis independentes cartografadas, ou numa base matricial; elaboração de matrizes binárias a partir dos dados relativos às unidades de terreno, considerando um determinado tipo de movimento de massa; cálculo do Valor Informativo para cada classe de cada variável; cálculo do Valor Informativo final por meio do somatório dos valores informativos parciais, relativos às variáveis independentes presentes em cada uma das unidades de terreno e a divisão final dos *scores* de Valor Informativo em classes de suscetibilidade, a partir da análise dos valores das unidades de terreno com movimentos de massa (ZÊZERE, 1997).

### 2.3.2 Técnicas de partição de inventários de movimentos de massa

Para a elaboração de um modelo de suscetibilidade, é importante a realização de um inventário de movimentos de massa, este pode envolver uma série de informações, tais como o local, tipo de movimento, volume, distância de deslocamento, estado de atividade e data de ocorrência do movimento em determinada área. Visando a realização deste processo, é importante a utilização de fotografias aéreas e/ou imagens de satélite com registros anteriores,

além da relação entre topografia, geologia e geomorfologia, visto que mostrar essa informação em mapas de inventário em conjunto com informações topográficas, áreas urbanizadas, estradas, rios, entre outras informações, colabora com o resultado final (MACEDO e BRESSANI, 2013).

Segundo Remondo et al. (2003) os modelos preditivos baseiam-se no pressuposto de que os futuros movimentos de massa tendem a ocorrer nas mesmas circunstâncias verificadas no passado. Macedo e Bressani (2013) afirmam que existe uma íntima relação entre os locais em que ocorreram os movimentos de massa e os que poderão ocorrer, podendo-se dizer, então, que o passado é um guia para o futuro.

Em caso de esse pressuposto ser completamente correto, o modelo obtido deverá fornecer uma predição realista, entretanto, isso pode não ocorrer pelo fato de que nem sempre as condições passadas se mantêm no presente, devido, principalmente, às diferentes intervenções antrópicas. Por esse motivo, é bastante pertinente a realização da validação dos resultados do modelo para se avaliar possíveis discrepâncias entre a realidade e a predição apresentada. Assim, os modelos preditivos de suscetibilidade devem ser validados para se verificar a sua capacidade de certeza sob pena de serem considerados inconsistentes do ponto de vista científico (ZÊZERE et al., 2004; PEREIRA, 2009).

Uma das formas de avaliar a qualidade de um modelo de suscetibilidade a movimentos de massa é utilizando as técnicas de participação dos inventários usando o mesmo conjunto de movimentos na construção do modelo de predição da suscetibilidade. Para Remondo et al. (2003), a validação pode ser melhorada utilizando-se uma população de movimentos de massa independente da que foi usada na construção do mapa de predição. Esta última posição é a mais aceita na bibliografia internacional sobre a validação de mapas de predição da suscetibilidade.

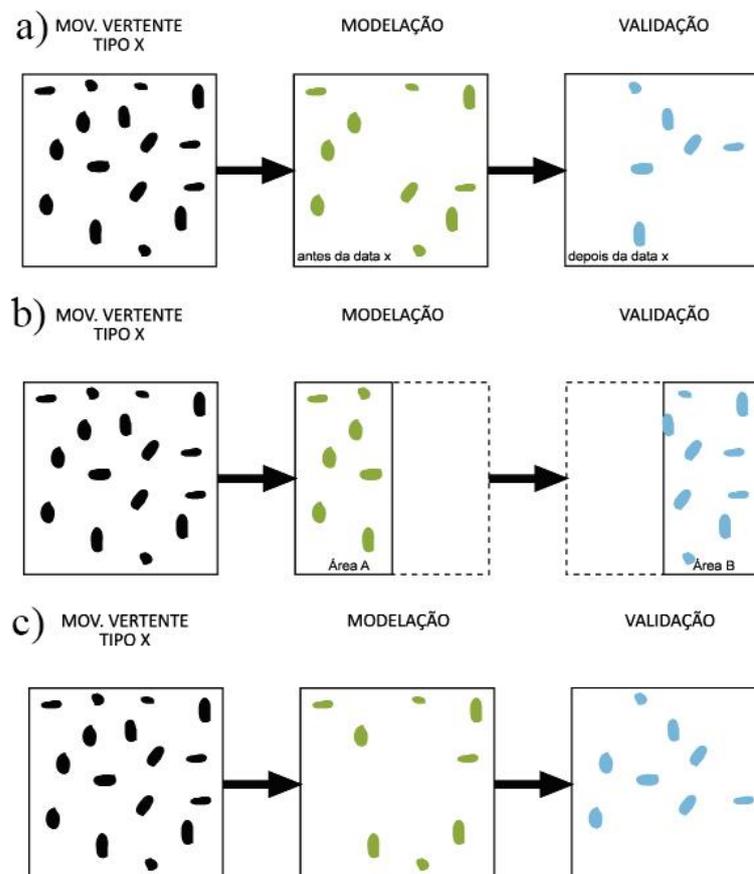
Pereira (2009) apresenta diferentes alternativas para a validação de modelos preditivos de suscetibilidade com a possibilidade de utilizar a partição temporal, espacial e aleatória, além das curvas de sucesso. Nas partições, é necessária a elaboração de uma base de dados de movimentos de massa ocorridos na área de estudo, para posteriormente se realizar as partições de acordo com o espaço, tempo ou até mesmo de forma aleatória, conforme a Figura 17.

Percebe-se que em “a”, os movimentos de massa são divididos em dois grupos de acordo com o tempo, ou seja, determina-se um período em que anterior a ele, as cicatrizes serão utilizadas para a realização do modelo, e posterior a ele, serão as utilizadas para comparar e assim validar o modelo, sendo eles encarados como “movimentos futuros”. Em “b” há uma condição bastante semelhante, mas ao invés de levar em consideração a questão temporal, é levada a espacial. Assim, a área é dividida espacialmente em duas porções, em que as cicatrizes

pertencentes a primeira porção serão consideradas para a elaboração do modelo preditivo, e as da segunda servirão de comparação para a validação. Isto só é possível quando as áreas são de características muito semelhantes, caso contrário a metodologia é inválida. Em “c” ocorre também uma operação semelhante, mas a escolha das cicatrizes não segue uma regra, ou seja, são escolhidas de forma aleatória.

É pertinente destacar algumas especificidades dentro dessas análises de validação, como por exemplo o fato de que a partição temporal nem sempre é viável, pois necessita do conhecimento da data de ocorrência dos movimentos de massa. Em caso de desconhecimento ou incerteza ela não é recomendada. Também se corre o risco de selecionar movimentos que foram desencadeados por períodos de precipitação com uma distribuição, intensidade e duração muito diferentes, o que poderia influenciar fortemente nos resultados. Apesar dessas questões, é considerada de grande valia no processo de validação.

Figura 17 - Validação do modelo a partir das partições temporal, espacial e aleatória.



Na espacial, salienta-se que mesmo em áreas próximas, as características locais como declividade, hipsometria, orientação de vertente, geologia, uso do solo, precipitação, entre outros, pode ser discrepante, o que poderia alterar a apresentação dos movimentos. Já na aleatória, deve-se ter cuidado de separar as cicatrizes com uma distribuição espacial semelhante, para não influenciar de forma abrupta nos resultados (CARRARA et al., 2008).

### 2.3.3 Curvas de taxa de sucesso na predição de suscetibilidade a movimentos de massa

A curva da taxa de sucesso baseia-se na comparação entre a predição estabelecida pela pesquisa e os movimentos de massa utilizados na modelação. Esta curva mede o melhor ajustamento entre o modelo e os movimentos de massa registados, concluindo o quanto o modelo obteve de sucesso. Assim, a taxa de predição compara o mapa de suscetibilidade com a distribuição dos movimentos de massa do grupo de validação selecionado previamente (PEREIRA, 2009a).

Para aferir a qualidade do modelo dentro deste contexto, pode-se, por exemplo, recorrer ao cálculo das “áreas abaixo da curva” (AAC) (GARCIA; ZÊZERE e OLIVEIRA, 2007), que utiliza da seguinte equação:

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[ (Lsi - Li) * \frac{ai+bi}{2} \right] \quad (3)$$

Em que:

$(Lsi-Li)$  = amplitude da classe;

$Ai$  = valor da ordenada correspondente a  $Li$ ;

$Bi$  = valor da ordenada correspondente a  $Lsi$

A avaliação do modelo preditivo é baseada na tabulação cruzada do mapa de suscetibilidade com a distribuição dos movimentos de massa. Quando esta é feita com os movimentos que originaram o mapa, obtém-se a taxa de sucesso. Por outro lado, quando é feita a partir de cicatrizes que não participaram desta etapa do processo, tem-se a taxa de predição. A área abaixo da curva (AAC), que varia entre 0 e 1, corresponde à capacidade preditiva mínima e máxima, respectivamente, e quantifica a capacidade preditiva do modelo (UBER; ZÊZERE e SANTOS, 2012).

Apesar de possuir uma ampla pesquisa bibliográfica e passos que são devidamente respeitados, é pertinente reconhecer que o modelo predito em sua versão final pode apresentar inconsistências. Desta forma, se faz importante a presença da validação, que é quando o pesquisador visa descobrir o grau de confiabilidade de seu modelo, havendo a possibilidade de fazer alterações na pesquisa e na modelagem.

#### **2.3.4 Exemplos de estudos de caso**

No contexto da presente pesquisa, entre as diversas metodologias para previsão de eventos como os movimentos de massa, tem-se sobressaído o uso de modelos matemáticos, como os modelos determinísticos que se baseiam em processos físico-naturais, levando em consideração os elementos topográficos no processo de modelagem e consequente previsão de suscetibilidade de determinadas áreas (FERNANDES et al., 2001). Para Tomlin (1983), a álgebra de mapas é um conjunto de procedimentos de análise espacial em geoprocessamento que gera novos dados a partir da manipulação de um ou mais planos de informação, originando um modelo.

Conforme Christofolletti (1999), os modelos são simplificações da realidade, consistindo em aproximações que não conseguem, e nem se quer tentam, incluir todas as variáveis existentes no ambiente. Isso se dá pelo fato da necessidade de se simplificar o mundo, que por sua vez é bastante complexo, o que inviabilizaria a reconstituição perfeita ao menos no nível de desenvolvimento tecnológico que se tem hoje. Jovens cientistas e novos investigadores, bem como os mais antigos, precisam ser conscientes das limitações da arte, ciência e tecnologia de modelagem de movimentos de massa.

O uso de modelos sempre foi algo comum nas geociências, se tornando mais em voga na década de 60. Na década seguinte, com o incremento da teoria probabilística e da adoção de modelos matemáticos, e mais tarde com a expressiva evolução da informática, com novos modelos de computadores, a partir dos anos 80, fez com que atualmente essa linha de pesquisa fosse uma das mais relevantes dentro da geomorfologia (CHRISTOFOLETTI, 1999).

No uso desses modelos, pode-se dizer que não há interferência direta do operador, ou pelo menos não se deveria ter. Assim, a subjetividade fica a cargo unicamente dos parâmetros escolhidos para a elaboração do modelo e não no seu resultado, fazendo com que a decisão seja guiada basicamente por processos que seguem as leis da natureza, não dando às rotinas do SIG o poder definitivo (ZAIDAN e FERNANDES, 2009).

É bastante pertinente se atentar às consequências das diferentes escalas de trabalho utilizadas, já que a maioria dos atributos topográficos podem apresentar diferenças na classificação em virtude do nível de detalhe adotado, podendo refletir diretamente no resultado de um modelo. Devido a essa característica, Silveira et al. (2014) afirmam que não se pode entender os dados obtidos por meio de MDT como de caráter definitivo, e sim como mais um instrumento que colabora para a elaboração de modelos que necessitam de trabalhos de campo para sua validação, sendo assim, comumente, produtos de caráter preliminar, que necessitem ser trabalhados com posteriores revisões e/ou reformulações, não sendo um mapa final.

No Brasil, os estudos específicos de suscetibilidade com uso de tecnologias como o SIG tiveram início na década de 90, e um exemplo desse tipo de pesquisa é a de Riedel et al. (1996), que elaboraram um trabalho de avaliação regional de suscetibilidade a movimentos de massa em taludes de corte voltados a obras viárias. Cerca de vinte anos depois, é evidente que as técnicas evoluíram, principalmente se observado todo o avanço tecnológico, mas tem-se que levar em consideração, ainda, as particularidades de cada pesquisa, principalmente relacionados ao volume e qualidade de dados que se tem disponível para avançar nos estudos.

Augusto Filho (1993) também realizou um trabalho bastante relevante, e nele, além da questão da suscetibilidade a movimento de massa, é pertinente destacar o uso da retroanálise, amplamente utilizada nesse tipo de trabalho na atualidade. O autor fundamentou sua pesquisa no entendimento dos agentes condicionantes e da dinâmica dos movimentos, destacando a declividade como atributo mais relevante na deflagração do tipo de movimentação para a área de estudo.

Mais recentemente, já nos anos 2000, Saito (2004) avaliou a suscetibilidade a movimentos de massa em assentamentos a partir do cruzamento de mapas temáticos dos aspectos físicos. A autora utilizou diferentes pesos para os elementos componentes da paisagem, com mapas geológico, de declividade, forma de vertentes, geomorfologia, formações superficiais e uso da terra. Com o cruzamento dos dados geraram-se classes hierárquicas de suscetibilidade, com os níveis nulo, baixo, moderado, alto, muito alto e crítico.

Ermini et al. (2005) consideraram em seu trabalho critérios de litologia, declividade, curvatura do terreno, cobertura da terra e área de contribuição a montante, empregando uma abordagem não-paramétrica, baseada em redes neurais artificiais (RNA), para o mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa em sua área de pesquisa.

Pfaltzgraff (2007) elaborou um mapa de suscetibilidade a movimentos de massa utilizando o método da álgebra de mapas. Destacam-se os mapas de geologia, declividade, solos, perfil vertical e horizontal de vertentes e uso do solo, que foram “somados” e,

posteriormente, comparados com o mapa de suscetibilidade (analógico) elaborado por Alheiros em 1998.

Ruff e Czurda (2008) aplicaram uma técnica empírica simples para avaliar a suscetibilidade em uma área de Vorarlberg (leste do Alpes Austríacos) que não era passível de análise estatística. Foram preparadas, digitalizadas, codificadas e ponderadas camadas de dados constituídas para classes geotécnicas, condições de acamamento, disposições tectônicas, declividade, inclinação, orientação de vertente, vegetação e erosão, com índices que refletem sua importância assumida na facilitação da instabilidade das vertentes.

Budetta, Santo e Vivencio (2008) produziram uma pesquisa com a utilização de uma abordagem heurística para a avaliação de suscetibilidade à queda de rocha e escorregamento ao longo das encostas de Cilento, ao sul da Itália. Os pesquisadores utilizaram dados topográficos, geológicos, geomecânicos, ambientais e de hidráulica, além da utilização de um índice de instabilidade baseado no *Hudson's RES (rock engineering system)*, que se trata de uma classificação de parâmetros implementada dentro de um SIG. Conforme Hudson (1994), o objetivo deste projeto foi desenvolver uma nova metodologia para a engenharia de rochas utilizando uma abordagem de sistemas denominada "Rock Engineering Systems" - RES.

A base desta abordagem é primeiramente estabelecer o(s) objetivo(s) de engenharia e, em seguida, construir um diagrama, que se trata de uma matriz de interação, na qual todas as variáveis relevantes para o problema estão listadas, juntamente com suas interações. O dispositivo de matriz permite que todas as interações, ou mecanismos, sejam identificados de forma coerente e abrangente. Os caminhos existentes na matriz de interação possibilitam que todas as possíveis relações de mecanismos e suas consequências sejam observadas. No primeiro ano do projeto, os fluxogramas da metodologia foram melhorados, no segundo, o objetivo era abordar a informatização da metodologia, e por fim, no terceiro, a metodologia foi refinada e testada com sucesso em uma encosta rochosa na Espanha e em uma local subterrâneo no Canadá, sendo considerada como uma metodologia de sucesso.

Carrara, Crosta e Frattini (2008) desenvolveram e compararam cinco modelos em SIG de fluxo de detritos em Val di Fassa, nos Alpes orientais Italianos. Os modelos se diferenciam em abordagem, se tratando de questões físicas e estatísticas, além do tipo de unidade de terreno, com unidades de declividade e células de grade (*grid cell*). Os resultados dão a percentagem de unidades do terreno corretamente classificadas e o número de fluxo de detritos na área classificada como instável, por meio da métrica das curvas intitulada de "ROC". Embora os cinco resultados sejam comparáveis, o modelo baseado em pequenas unidades de declividade foi o que apresentou melhor desempenho para a referida área de estudo.

Melchiorre et al. (2008) avaliaram a suscetibilidade a escorregamentos para uma pequena bacia hidrográfica na porção sul dos Alpes Italianos. Análises de *cluster* otimizaram a seção de treinamento, avaliação e testes de dados e de Redes Neurais Artificiais (RNA), classificando células estáveis e instáveis. Foram selecionadas estrategicamente amostras aleatórias de “não-escorregamento” provindas de células de grade sem movimentos de massa, usando uma medida de distância específica de domínio em agrupamento. Os autores introduziram o conhecimento de peritos em modelagem RNA, melhorando a capacidade e previsão.

Nefeslioglu, Duman e Durmaz (2008) utilizaram análises de regressão logística e avaliaram a suscetibilidade a escorregamentos no Vale Kelkit, na região tectônica do mar Negro na Turquia Oriental. Quatro conjuntos de dados diferentes foram construídos considerando fatores condicionantes, aplicando amostras estratégicas para o conjunto de treinamento. Os melhores resultados foram obtidos do conjunto de dados em que parâmetros de topografia e variáveis litológicas fictícias foram utilizados em conjunto e 50% dos dados de treinamento foram selecionados aleatoriamente a partir das “células semente” (*seed cells*).

Frattini et al. (2008) elaboraram uma abordagem estatística e física para prever a suscetibilidade a quedas em Val di Fassa, no leste dos Alpes Italianos. Análises discriminantes identificaram células com baixas e altas suscetibilidade a quedas. Uma simulação 3D calculou a intensidade da distância, do desvio e a frequência das quedas cujas células correspondem a polígonos de origem geomorfologicamente definidas ou, células com declividades que excediam um limiar empírico. Para cada cenário, as células de grade de origem foram atribuídas a uma suscetibilidade de início fixo ou variável. O cenário geomorfológico com suscetibilidade de início variável demonstrou ser a mais realista.

Chung e Fabbri (2008) revisaram as limitações das técnicas mais utilizadas para produzir mapas de suscetibilidade. Eles sustentam que os dois principais inconvenientes são a falta de testes para a confiabilidade dos resultados da predição e a ausência de formas de estimar as probabilidades de movimentos futuros. Visando solucionar essas deficiências, os autores propõem um procedimento baseado em duas etapas analíticas, mapeamento de risco (suscetibilidade) relativo e estimativa de probabilidade empírica. Os autores afirmam que tais métodos preditivos têm pouco significado a menos que sejam acompanhados por medidas empíricas que avaliem a confiabilidade dos resultados. Segundo os autores, um desses métodos seria a validação cruzada.

Abella e Westen (2008) estimaram o risco de movimentos de massa para um município rural no leste de Cuba que não é adequado para análise por métodos puramente quantitativos.

Os autores desenvolveram um modelo heurístico simples de suscetibilidade a movimentos de massa baseado em pesos atribuídos pelo juízo de especialistas a fatores que incluem gradiente de declive, relevo interno, forma de declive, unidade geológica, falhas ativas, distância da drenagem, distância da fonte mais próxima, subunidades geomorfológicas e cicatrizes de movimentos de massa existentes. O mapa de risco de movimento de massa resultante foi usado em combinação com a informação existente sobre edifícios e infraestrutura para preparar um mapa qualitativo de risco de movimento de massa.

Zêzere et al. (2008) avaliaram o risco de escorregamentos translacionais rasos e rotacionais para estradas e edifícios em um pequeno local nas proximidades de Lisboa (Portugal). Os dados sobre o perigo de movimento de massa, elementos em risco e vulnerabilidade foram integrados num SIG. Os autores avaliaram o risco em um cenário desencadeante de movimento de massa com um período de retorno de chuva específico. A vulnerabilidade para os três tipos de movimento foi classificada considerando a magnitude do movimento de massa, os níveis de danos causados por falhas passadas e os dados da literatura. A análise de risco final estimou os custos diretos a partir do mapa de risco para o cenário de precipitação, o mapa de vulnerabilidade e um mapa de valor econômico dos elementos expostos.

Remondo, Bonachea e Cendrero (2008) realizaram um estudo de avaliação de risco na área de Bajo Deba, no norte de Espanha, onde um modelo de suscetibilidade foi elaborado a partir de relações estatísticas entre movimentos passados e parâmetros do terreno. Foram extrapolados eventos de movimentações prévios para calcular a frequência de falha para os próximos 50 anos. Os autores estimaram perdas diretas (monetárias) passadas por tipo de elemento em risco (estradas e edifícios) e avaliaram a vulnerabilidade através da comparação das perdas com o valor real dos elementos afetados. O risco foi calculado para cada elemento de risco, vulnerabilidade e valor monetário. Os resultados incluem mapas de risco direto e perdas indiretas estimadas a partir da interrupção das atividades econômicas avaliadas.

Conoscenti, Maggio e Rotigliano (2008) desenvolveram em seu artigo uma avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Iato, no noroeste da Sicília, por meio do estudo da variação das formas do relevo, classificadas como áreas de movimentos de massa, escarpas e topo de morro. Para tanto, foram selecionados alguns fatores, tais como: base litológica, declividade, índice de umidade topográfica e índice de potência de fluxo. O processamento dos dados foi realizado de acordo com a análise bivariada das relações entre fatores e densidades de movimentos de massa.

A área de estudo de Conoscenti, Maggio e Rotigliano (2008) apresentava declividades moderadamente relacionadas com os movimentos do tipo fluxo e escorregamento rotacional, sendo registrados 219 e 28 casos de cada um deles respectivamente. O índice de potência de fluxo ao pé das vertentes foi gerado automaticamente em ambiente SIG, em que os autores perceberam uma relação positiva com as densidades de movimentos marcadas pelas classes no mapeamento. O procedimento de validação confirmou que a escolha da forma da instabilidade influenciou os resultados da análise de suscetibilidade, e que os modelos preditivos foram satisfatórios.

O SHALSTAB – SHAllow Landslide STABility é um modelo matemático determinístico bastante utilizado nos EUA (DIETRICH, W. E e MONTGOMERY, 1998), na Itália, Argentina e Nova Zelândia (RAFAELLI, MONTGOMERY e GREENBERG, 2001; CLAESSENS et al., 2005) e em Portugal (TEIXEIRA et al., 2014). No Brasil alguns autores, como Fernandes et al. (2001) e Vieira e Ramos (2015), já lançaram mão do uso dessa ferramenta para avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa.

O modelo foi criado na década de 90 por Willian Dietrich, na Universidade da Califórnia em Berkeley, recebendo o seu nome quando do lançamento de uma versão com interface mais amigável disponível em ambiente Windows por meio do *software* ArcGIS, a partir da terceira versão (DIETRICH, W. E. MONTGOMERY, 1998).

O SHALSTAB trabalha com estrutura matricial e permite a adoção de valores diferenciados para suas variáveis. É utilizado para prever áreas suscetíveis à ocorrência de escorregamentos translacionais rasos com boa definição do plano de transição e com forte diminuição do processo de infiltração, como em caso de presença de transição solo-rocha, mas não sendo tão eficaz para aplicações em áreas de solos espessos, áreas com baixa declividade, afloramentos de rochas, e áreas escarpadas (GUIMARÃES, 2000).

O SHALSLAB é baseado em uma combinação entre modelos de estabilidade de talude utilizando para isso o cálculo do Fator de Segurança (FS) (MORGENSTERN e SANGREY, 1978) e o modelo hidrológico, que define um padrão de saturação do relevo baseado em fatores como área drenada, exutório e o ângulo de declividade do terreno (ZAIDAN e FERNANDES, 2009). Um fato importante é que a utilização do modelo SHALSTAB demonstrou bons resultados em diversos países e com dados bastante diferenciados, inclusive com variação da resolução das bases cartográficas, quando comparados a outros modelos de previsão (RAFAELLI, MONTGOMERY e GREENBERG, 2001; CLAESSENS et al., 2005).

Fernandes e Amaral (2000) destacam que a utilização de modelos determinísticos com bases físicas, ou até mesmo em outros processos, permite que as mais variadas hipóteses sejam

testadas, e o mais interessante é a possibilidade de gerar esse tipo de trabalho tanto na escala da vertente quanto em uma bacia de drenagem completa. Com relação a isso, Zaidan e Fernandes (2009) comentam que a disponibilidade de bases cartográficas necessárias para a geração dos novos mapeamentos fundamentais para o desenvolvimento dos trabalhos é uma questão bastante importante, sendo um problema até mesmo nos dias de hoje em nosso país, visto que por diversas vezes há certa dificuldade em se obter produtos com escala de detalhe suficiente.

Zaidan e Fernandes (2009) utilizaram restituição aerofotogramétrica, na escala de 1:2.000, para gerar o mapa de altimetria baseado nas curvas de nível e na drenagem. O modelo digital de elevação e a carta de declividade foram geradas com resolução do *pixel* de 1 metro, obedecendo os critérios de precisão cartográfica de 1:2.000, no módulo *Spatial Analyst* do *software* ArcGIS. Nesta etapa, os autores optaram pela ferramenta *Topo to Raster*, justificando a escolha pelo fato de alguns pesquisadores, como Guimarães (2000) e Rabaco (2005), terem citado que consideram um dos métodos mais adequados para a representação superficial com maior coerência de acordo com os processos hidrológicos. Outra particularidade interessante do trabalho desenvolvido por Zaidan e Fernandes (2009) foi o fato de que após terem gerado o modelo SHALSTAB, e diante das observações de suas potencialidades e fraquezas, os autores optaram por descartar os resultados obtidos nas porções de topo de vale, por não serem precisos o suficiente.

De maneira resumida, Zaidan e Fernandes (2009) criaram classes de suscetibilidade para as áreas de encosta da bacia hidrográfica que fossem compatíveis com a análise estabelecida pelo modelo SHALSTAB. As classes utilizadas foram: áreas estáveis, áreas de média instabilidade e áreas instáveis. E como resultado, percebeu-se que as cicatrizes de movimentos de massa quase não apareceram em áreas urbanas, o que é apontado pelos autores como sendo um dado mascarado devido à dinâmica da população, que altera o ambiente e camufla a existência de registros pretéritos dos processos. Isso também gerou uma dificuldade na classificação dos movimentos de massa, visto que a maioria se apresentou com um estágio erosivo já bastante avançado e também já modificada por possíveis obras de remoção de entulho e reparo de danos.

Apesar disso, o modelo de suscetibilidade gerado para a bacia apresentou resultados satisfatórios quanto ao seu processo de validação, constatando-se que na área de cada cicatriz havia a ocorrência de pelo menos uma célula instável ou incondicionalmente instável (essa denominação não consta na classificação final pois foi agrupada com outras, fazendo parte das “Áreas estáveis”). Os pesquisadores ainda fazem duas sugestões, a primeira que seria relativa à validação, em que seja feito um inventário da classificação das células de suscetibilidade

dentro da área de cada cicatriz para se verificar a proporção de instabilidade dentro de cada uma delas, e a segunda, em que seria pertinente testar modelos de generalização cartográfica nos mapas gerados pelo SHALSTAB, para se tentar eliminar impurezas ou ruídos, o que poderia melhorar os resultados para uma futura análise analógica ou digital dos mapas (ZAIDAN e FERNANDES, 2009).

Strieder et al. (2008a) realizaram um estudo de previsão de áreas favoráveis a escorregamentos por meio da modelagem SIG para Aparados da Serra. Neste é apresentado um modelo em ambiente SIG para prever áreas suscetíveis a escorregamentos considerando o FS (Fator de Segurança) e algoritmos. As áreas com menor FS foram definidas como alta suscetibilidade para a ocorrência de escorregamentos. As investigações de campo com relação à existência de escorregamentos na região confirmam as previsões do modelo.

Conforme Strieder et al. (2008a) a determinação do FS deve ser interpretada de maneira relativa para a definição do grau de suscetibilidade. A modelagem que se utiliza de FS pode ser aplicada para um mapeamento de suscetibilidade a movimento de massa em áreas com carência de registros históricos, desde que apoiada em investigações geológicas e geotécnicas adequadas.

Os mesmos autores também desenvolveram um trabalho relativo à previsão de áreas suscetíveis a fluxo de detritos para Aparados da Serra, divisa dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, utilizando a modelagem em SIG. Nesta pesquisa foram utilizadas variáveis como geologia, geotecnia, solo, vegetação, MDT, além da incorporação do regime de precipitação da área de estudo no modelo. A área de estudo compreende as vertentes compostas principalmente por arenitos (Formação Botucatu), basaltos e dacitos (Formação Serra Geral), pertencentes a Bacia do Paraná. Também é interessante, nesta contextualização, destacar que a escarpa possui 1.000 m de altitude, e a área é fortemente caracterizada por vales em “V” (STRIEDER et al., 2008b).

Com relação ao modelo propriamente dito, Strieder et al. (2008b) tiveram como objetivo descobrir onde os fluxos de detritos iniciavam e onde eles paravam, ou seja, onde havia deposição. O algoritmo utilizado é baseado no Unit Stream Power – Based Erosion Deposition (MITAS e MITASOVA, 1998). O modelo é baseado na premissa de que o fluxo de sedimento pode ser estimado pela capacidade de transporte, levando em consideração o Índice de Erosividade Pluviométrica e de escoamento superficial (devido à precipitação anual média); o Parâmetro de erodibilidade do solo (relacionado às propriedades físicas e químicas dos solos); parâmetros relacionados à cobertura e manejo da vegetação e usos do solo e práticas de conservação; área; inclinação e constantes relacionadas à água de escoamento e aos tipos de

solo. O modelo foi realizado no *software* ArcGIS com rotinas do *Spatial Analyst*, com procedimentos baseados em Mitas e Mitasova (1998), no *datum* SAD69/96. O MDT foi desenvolvido com a utilização de imagem de radar, ASTER, com a utilizando o *software* ENVI. O modelo foi dividido em 4 classes, sendo elas: áreas suscetíveis à erosão; áreas suscetíveis à deposição; áreas que apresentam padrão de interferência (erosão/deposição) e áreas estáveis.

Pereira (2009) se propôs a realizar a suscetibilidade a movimentos de massa na região norte de Portugal, em suas dimensões espacial e temporal e em diferentes escalas de análise. A base de dados de movimentos de massa foi construída com base em pesquisas em periódicos, artigos científicos e teses de doutorado, entre 1900 e 2007, tendo as ocorrências sido georreferenciadas num SIG. Aplicou-se uma análise estatística bivariada a grande escala, com base nos métodos do Valor Informativo e da Lógica Difusa. As principais temáticas utilizadas na elaboração dos modelos foram: declividade, orientação de vertente, perfil de curvatura, litologia, geomorfologia, uso de solo, densidade de falhas e arranjo das vertentes.

Bispo et al. (2011) elaboraram um trabalho que é referência nessa linha de pesquisa, que compara a aplicação de três métodos de inferência espacial, sendo eles booleano, bayesiano e fuzzy gama, na análise da suscetibilidade a movimentos de massa, avaliando o efeito da inclusão de variáveis geomorfométricas (curvaturas vertical e horizontal) nos modelos. Nesta pesquisa, os autores testaram cinco variáveis (geomorfologia, geologia, pedologia, uso da terra e declividade) e, em seguida, sete variáveis (incluindo as curvaturas vertical e horizontal).

Moraes (2012) desenvolveu uma análise com a utilização de Avaliação de Multicritérios, técnica AHP – *Analytic Hierarchy Process*, para o mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos no município de Angra dos Reis, Rio de Janeiro. Foram utilizadas imagens Landsat-7, TM, dados disponibilizados pela Defesa Civil e os parâmetros de declividade, geomorfologia, pedologia e cobertura e uso da Terra.

Vanacôr e Rolim (2012) produziram um trabalho apresentando um método para mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa na região nordeste do Rio Grande Sul, Brasil. Nele foram desenvolvidas a seleção e análise de fatores condicionantes de movimentos de massa e o mapeamento da suscetibilidade com uso de *software* de SIG, sensoriamento remoto e estatística bivariada. Foram utilizados parâmetros topográficos, geológico-geotécnicos e antrópicos, que foram gerados a partir de imagens ASTER, fotografias aéreas e mapas temáticos. Foi escolhido o método *Analytical Hierarchy Process* (AHP), com base na lógica de comparação pareada, e por meio da avaliação por critérios múltiplos, foi definido o peso de cada plano de informação com a utilização do método de combinação linear ponderada. Por fim, obteve-se como produto o mapa de suscetibilidade da área de estudo.

Salgado (2013) realizou uma análise de movimentos de massa do tipo escorregamento planar em uma micro-bacia hidrográfica de Nova Friburgo, Rio de Janeiro, com a elaboração de um mapa de suscetibilidade, fazendo uso do Sistema de Informação Geográfica. Para desenvolver a avaliação espacial, a autora utilizou o método do Valor Informativo, que se trata de um método de análise bivariada, baseada na suposição de que a predição do fenômeno analisado deve começar por meio da análise da distribuição espacial dos movimentos existentes em cada fator condicionante. Por meio da taxa de sucesso, pôde-se observar que a melhor combinação de fatores condicionantes foi: uso do solo, geologia, curvatura, declive, altura e densidade de drenagem, obtendo-se uma taxa de sucesso de 0,76 para o mapa final. Foi percebido que os fatores curvatura, geologia, e uso do solo foram os que se mostraram mais importantes para a avaliação da suscetibilidade, sendo seguidos respectivamente pelo declive, altura, e densidade de drenagem. A autora concluiu que a análise estatística bivariada com a utilização do cálculo do valor informativo foi bastante pertinente para a predição da suscetibilidade a movimentos de massa em sua área de estudo.

Silveira et al. (2014) desenvolveram um mapeamento preliminar de suscetibilidade natural a movimentos de massa utilizando como área de estudo a Serra do Mar paraense, apoiado na análise digital do terreno. Nele, foi levado em consideração a relevância da representação da morfologia por meio da utilização de atributos topográficos extraídos, por sua vez, do MDT. Diante disso, foram julgadas importantes três variáveis: hipsometria, declividade e plano de curvatura, com o posterior uso da álgebra de mapas. Ao final do processo foram definidas três classes, sendo elas muito alta, alta e moderada suscetibilidade, contemplando os movimentos de massa relativos a escorregamentos, corridas de detritos, escorregamentos somados a corridas de detritos e inundações em conjunto a corridas de lama. Diante do resultado, o trabalho realizou duas comparações pertinentes, a primeira foi uma comparação com um inventário de cicatrizes, realizado a partir de imagens *WorldView-1*, culminando em uma compatibilidade bastante positiva de 89% e a segunda relativa a um conjunto de pontos em campo, sendo 88% deles concordantes com o modelo gerado.

No trabalho de Silveira et al. (2014), há de se destacar o polinômio empregado no cálculo das derivadas direcionais para a declividade, que foi o de Horn (1981), e para o plano de curvatura, que foi o de Zevenbergen e Thorne (1987). Conforme os autores, essas escolhas se deram em virtude da compatibilidade com o *software* utilizado, que no caso é o ArcGIS, no módulo *Spatial Analyst* (ESRI, 2010).

Silveira et al. (2014) justificam a escolha dos três atributos, hipsometria, declividade e plano de curvatura, indicando que o primeiro, que se refere à variação do valor da altitude, é

dado a partir do nível do mar. A declividade, por sua vez, é definida como um plano tangente à superfície, correspondendo a inclinação do terreno em relação ao plano horizontal, expresso como a mudança de altitude sobre determinada distância (BURROUGH, 1986). Esta tem sido uma importante variável nos estudos sobre movimentos de massa, em que pode-se citar como exemplo os trabalhos de Fernandes et al. (2001), Guimaraes et al. (2003), Kozciak (2005), Vieira (2007), Tabalipa (2008), Silva; Silveira e Fiori (2012) e Silveira et al. (2013).

Por fim, o plano de curvatura, que também pode ser chamado de curvatura em planta, refere-se ao caráter divergente ou convergente dos fluxos de matéria sobre o terreno quando analisado em projeção horizontal. Desta maneira, é bastante pertinente na intenção de caracterizar processos relacionados ao transporte de sedimentos pelo fato de apresentar a propensão da água convergir ou divergir sobre as vertentes (VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003; GALLANT e WILSON, 2000; SILVEIRA et al., 2014).

Silveira et al. (2014) também destacaram a grande compatibilidade da variável plano de curvatura com os processos de corridas de detritos, que concentraram-se em sua maioria nas áreas convergentes, visto que esse atributo topográfico está relacionado à dinâmica da água nas vertentes, tanto em fluxos superficiais como subsuperficiais. Para o estudo de suscetibilidade a movimentos de massa essa interação foi de suma importância visto que alguns processos, principalmente as corridas de detritos, estão relacionados diretamente ao transporte em estado de solifluxão, tanto a mobilização do material proveniente dos movimentos (solo, rocha e árvores), como a remobilização e exumação de depósitos pretéritos.

Importante, também, nessa análise, é a correta classificação dos movimentos de massa que ocorrem nas vertentes considerando Silveira et al. (2014), que podem vir a se encaixar em outras pesquisas desde que levadas em consideração as especificidades de cada área, e o fato de ter distinguido processos que designam “escorregamentos” de “escorregamentos e corridas”. Isso é importante à análise morfológica da vertente, visto que o que diferencia as duas classes é que a segunda é composta por vertentes com plano de curvatura convergente, ou seja, vertentes coletoras do fluxo hídrico superficial e subsuperficial e de materiais, que não só favorecem os escorregamentos por saturação hídrica, como também acumulam material em solifluxão das corridas, verificando-se, desta maneira, que as áreas situadas nos segmentos de vertentes com convergência de fluxo hídrico, há a potencialização da concentração de água, facilitando o desprendimento de material e sua remobilização.

A decisão pela escolha dos atributos de declividade e plano de curvatura foi fortemente influenciada pela pesquisa de Pozzobon (2013), que constatou, por meio de uma abordagem probabilística com uso da técnica de pesos de evidência, que entre uma série de variáveis, os

atributos topográficos de declividade e plano de curvatura foram os que apresentaram melhor relação com os movimentos, levando em consideração a área de estudo, neste caso, Blumenau/SC. Outros autores também dão indícios dessa relação, tais como Cruden e Varnes (1996), Dikau (2004), Matsushi, Hattanji e Matsukura (2006) e Fiori e Carmignani (2009).

Henriques (2014) realizou uma ampla pesquisa com a aplicação de um conjunto de metodologias que permitissem aprofundar o conhecimento sobre as causas que influenciam a ocorrência espacial e temporal da instabilidade de vertentes em uma escala regional. A área de estudo selecionada para este trabalho compreende três sub-bacias hidrográficas, localizadas 90km a Norte de Lisboa, respectivamente Arnoia, Tornada e Alfeizerão (totalizando 275,9 km<sup>2</sup>). Estas sub-bacias foram escolhidas devido às suas características geológicas, geomorfológicas e também por se tratar de uma área propensa a instabilidade de vertentes. A autora fez a utilização do método de base físico dinâmico (STARWARS + PROBSTAB) e o método de base estatística (Valor Informativo). Neste segundo, foram considerados os seguintes fatores de predisposição à susceptibilidade: declive; exposição; curvatura (perfil transversal das vertentes); inverso do Wetness Index; litologia; morfo-estrutura; espessura de solo potencialmente instável; e tipos de solo (de acordo com a textura). Destas análises, foi possível concluir que todos os fatores podem ser incluídos nos modelos de susceptibilidade sem que a sua capacidade preditiva fique comprometida. Pode-se constatar, também, que o fator de maior importância foi a litologia, seguida da declividade e da morfo-estrutura. A pesquisadora conclui afirmando que, com base nos resultados da pesquisa, é possível concluir que, apesar das vantagens evidenciadas pelos métodos de base física, todas as abordagens são válidas e até mesmo complementares no que concerne à susceptibilidade aos deslizamentos translacionais superficiais.

Importantes conclusões podem ser tiradas a partir de análises dos artigos citados na presente seção. Percebe-se que métodos qualitativos (como exemplo, os indexados e os heurísticos) e quantitativos (estatísticos, redes neurais, e físicos) são atuais, embora uma mudança para as últimas abordagens pareça estar bem encaminhada (GIS EDITORIAL, 2008).

A confiabilidade das predições dos eventos de movimento de massa ainda está longe de ser unanimidade. As muitas ferramentas analíticas, escalas de mapas diferentes e grande variedade na entrada de dados para os modelos, impedem a definição de padrões claros para comparar os resultados preditivos, principalmente no caso do Brasil, em que a carência de dados é um fator bastante limitador. Neste sentido, ainda é muito difícil identificar “a melhor” abordagem ou o conjunto de técnicas ideal na evolução da modelagem de risco com a utilização de SIG (GIS EDITORIAL, 2008).

A qualidade dos dados de entrada do modelo, tanto no que tange os inventários de movimentos de massa como os fatores desencadeadores, continuam a atrair menos preocupação do que o método e a tecnologia. Com demasiada frequência, observações coletadas rapidamente e com baixo custo oferecem maior apelo do que as informações difíceis de serem adquiridas, que seriam mais prováveis de explicar a instabilidade da vertente, e isso acaba sendo bastante preocupante para a evolução da modelagem. Assim, não importa o quão sofisticada seja a manipulação de dados, ela nunca deve compensar observações incoerentes ou de baixa qualidade. É válido sempre lembrar que a vida de pessoas inocentes pode estar em risco por ignorar esta questão, e isso é mais que uma boa razão para se levar a sério esse ponto (GIS EDITORIAL, 2008).

De acordo com o GIS Editorial (2008), a maioria das investigações de movimentos de massa tem origem no ambiente acadêmico e comumente esse trabalho de "estudo de caso" ainda não está suficientemente relacionado com o mundo real do planejamento do uso da Terra, da conservação do solo e da fiscalização da segurança pública. Um sintoma desta desconexão pode ser a escassez de bons dados de entrada. O apoio acadêmico por si só raramente é suficiente para permitir o mapeamento do risco em uma base regional, principalmente falando de países subdesenvolvidos, em que as pesquisas de ponta ainda passam ao largo da realidade.

Da mesma forma, o GIS Editorial (2008) afirma que modelar os movimentos de massa para criar mapas digitais de suscetibilidade e risco é apenas uma parte da tarefa geral, que é a de proteger a vida humana e a propriedade contra movimentações futuras de massa. Os tipos de técnicas e mapas baseados em SIG farão pouco mais do que engordar nossas bibliografias de pesquisa a menos que encontrem seu caminho nas mãos dos tomadores de decisão nos níveis apropriados. Os pesquisadores da referida conferência afirmam que poderíamos nos beneficiar se houvessem menos reuniões especializadas centradas nos resultados da pesquisa e mais encontros interdisciplinares que ligassem os pesquisadores com os funcionários públicos potencialmente capazes de implementar esse importante trabalho desenvolvido (GIS EDITORIAL, 2008).

Reduzir o risco de movimentos de massa por meio de avanços em pesquisas como a presente, só pode ter êxito em um ambiente político, econômico e social receptivo (PIKE, HOWELL e GRAYMER, 2003). Evitar que os perigos de movimentos de massa se tornem desastres pode ser uma expectativa realista (GIS EDITORIAL, 2008).

Impulsionados pela crescente preocupação com a confiabilidade do modelo e a necessidade de defender as avaliações de riscos aos funcionários encarregados de aplicá-los na arena da política pública, mais modeladores de movimentos de massa estão testando seus

resultados numericamente. Nesse contexto, adverte-se contra o uso descuidado de "validação", um termo inflacionado que enganosamente conota a aceitabilidade absoluta (ex: ambos/ou, sim/não, certo/errado). Em vez disso, esses tipos de modelos só podem ser avaliados, isto é, testados para determinar um grau de aceitabilidade relativo, ou seja, "melhor/pior, mais/menos" (ORESQUES, 1998).

Diante de uma apreciação dos trabalhos apresentados neste item, que fazem uso de SIG para analisar movimentos de massa, mais especificamente elaborando modelos preditivos, percebe-se que há certa riqueza de dados que facilita tanto a pesquisa inicial quanto à validação. Dessa forma, quando os pesquisadores possuem uma boa base cartográfica, com escalas satisfatórias, há uma probabilidade maior de trabalhos mais precisos, eliminando-se possíveis erros e incertezas que prejudicariam os resultados. Da mesma forma, com inventários e registros de movimentos anteriores, ou até mesmo pelo fato da ocorrência de eventos de grande magnitude, é mais fácil de estimar o nível de acurácia do modelo gerado, visto a possibilidade de comparação com determinados dados (retroanálise).

Visando sintetizar os trabalhos que desenvolveram análises relativas a diferentes movimentos de massa com a utilização de processos em SIG, foi elaborado o Quadro 6, que resume e apresenta em ordem cronológica os autores, os fatores e as principais variáveis utilizadas na construção de seus modelos. Destaca-se que alguns trabalhos não estão presentes na síntese, pois não apresentaram de forma clara a utilização das variáveis em suas etapas de pesquisa.

Quadro 6 - Síntese dos autores e variáveis escolhidas para a construção dos modelos de suscetibilidade a movimentos de massa.

(continua)

<b>Autores</b>	<b>Fatores</b>	<b>Variáveis</b>
<b>Riedel et al. (1996)</b>	Geológicos	Famílias de juntas de falhas e Foliação
<b>Fernandes et al. (2001)</b>	Geológicos	Espessura, condutividade hidráulica saturada, densidade, coesão e ângulo de atrito
	Morfológicos	Declividade e perfil de curvatura
	Hidrológicos	Precipitação
<b>Saito (2004)</b>	Geológicos	Litologia e formações superficiais
<b>Saito (2004)</b>	Morfológicos	Declividade, perfil de curvatura e geomorfologia
	Antrópicos	Uso da terra
<b>Ermini et al. (2005)</b>	Geológicos	Litologia
	Morfológicos	Declividade e perfil de curvatura
	Hidrológicos	Área de contribuição à montante
	Antrópicos	Cobertura da terra
<b>Pfaltzgraff et al. (2007)</b>	Geológicos	Litologia e Solos

(continuação)

	Morfológicos	Declividade, perfil de curvatura e plano de curvatura
	Antrópicos	Uso do solo
<b>Ruff e Czurda (2008)</b>	Geológicos	Distancia de falhas, litologia e erosão
	Morfológicos Antrópicos	Declividade, orientação de vertente, perfil de curvatura, plano de curvatura e direção de fluxo Vegetação (ortofotos)
<b>Budetta, Santo e Vivenzio (2008)</b>	Geológicos	Litologia, geomecânica, índice de instabilidade
	Morfológicos	Declividade e orientação de vertente
	Hidrológicos	Movimento das ondas, intensidade de chuva e água subterrânea
	Antrópicos	Vegetação
<b>Nefeslioglu, Duman e Durmaz (2008)</b>	Geológicos	Litologia
	Morfológicos	Hipsometria, declividade, orientação de vertente, perfil de curvatura, plano de curvatura, índice de capacidade de transporte de sedimento, índice de poder de fluxo e índice de umidade topográfica
<b>Chung e Fabbri (2008)</b>	Geológicos	Litologia e depósitos superficiais
	Morfológicos	Hipsometria, declividade e orientação de vertente
	Antrópicos	Uso da terra
<b>Castellanos, Abella e Westen (2008)</b>	Geológicos	Litologia, relevo interno, falhas ativas e distance to nearest spring
	Morfológicos	Declividade, perfil de curvatura, plano de curvatura, subunidades geomorfológicas e distância a drenagem
<b>Zêzere et al. (2008)</b>	Geológicos	Litologia e depósitos superficiais
	Morfológicos	Declividade, orientação de vertente, perfil de curvatura e geomorfologia
	Antrópicos	Uso da terra
<b>Remondo, Bonachea e Cendrero (2008)</b>	Geológicos	Litologia
	Morfológicos	Declividade e orientação de vertente
	Antrópicos	Vegetação
<b>Conoscenti, Maggio e Rotigliano (2008)</b>	Geológicos	Litologia
	Morfológicos	Declividade, índice de umidade topográfica e índice de potência de fluxo
<b>Strieder et al. (2008a)</b>	Geológicos	Densidade de água, densidade natural do solo, densidade do solo saturado, densidade do solo drenado, resistência ao cisalhamento no pico, resistência ao cisalhamento residual, coesão triaxial, coesão de cisalhamento direta não deformada e espessura do colúvio
	Morfológicos	Declividade
	Hidrológicos	Nível freático
	Antrópicos	Uso da Terra
<b>Strieder et al. (2008b)</b>	Geológicos	Litologia, geotécnico e solo
	Morfológicos	Declividade e orientação de vertente
	Hidrológicos	Intensidade da chuva e gradientes hidráulicos
	Antrópicos	Vegetação
<b>Zaidan e Fernandes (2009)</b>	Morfológicos	Hipsometria e declividade
	Antrópicos	Uso e ocupação
<b>Pereira (2009)</b>	Geológicos	Litologia, densidade de falhas
	Morfológicos	Declividade, orientação de vertente, perfil de curvatura, geomorfologia e arranjo das vertentes.
	Antrópicos	Uso do solo

(conclusão)

<b>Bispo et al. (2011)</b>	Geológicos	Litologia e solo
	Morfológicos	Geomorfologia, declividade, perfil de curvatura e plano de curvatura
	Antrópicos	Uso da terra
<b>Moraes (2012)</b>	Geológicos	Solo
	Morfológicos	Declividade e geomorfologia
	Antrópicos	Cobertura vegetal e uso da terra
<b>Vanacôr e Rolim (2012)</b>	Geológicos	Litologia
	Morfológicos	Hipsometria, declividade, orientação de vertente, distância a drenagens e distância de estradas
	Antrópicos	Uso do solo e cobertura vegetal
<b>Pozzobon (2013)</b>	Geológicos	Litologia e distância de lineamentos morfoesculturais
	Morfológicos	Declividade, orientação de vertente, perfil de curvatura e plano de curvatura
	Antrópicos	Uso do solo e índice de vegetação
<b>Salgado (2013)</b>	Geológicos	Geologia
	Morfológicos	Declividade, Perfil de curvatura, altura das vertentes e unidades geomorfológicas
	Hidrológicos	Densidade de drenagem
	Antrópicos	Uso do solo
<b>Silveira et al. (2014)</b>	Morfológicos	Hipsometria, declividade e plano de curvatura
<b>Henriques (2014)</b>	Geológicos	Litologia, espessura do solo e tipos de solo
	Morfológicos	Declividade, orientação de vertente, perfil de curvatura, inverso do Wetness Index e morfo-estrutura.

Fonte: Autor.

De acordo com o quadro, é possível perceber que dos 24 trabalhos analisados na elaboração do referencial teórico apenas um deles, o de Riedel et al. (1996), não utilizou variáveis morfológicas. Os aspectos geológicos só não estiveram presentes em duas, das 21 pesquisas, que foram os trabalhos de Zaidan e Fernandes (2009) e Silveira et al (2014). Cabe salientar que esses dois trabalhos apresentavam poucas variáveis (de duas a três), e todas elas eram morfológicas.

Os fatores hidrológicos foram utilizados em seis pesquisas e os antrópicos em quatorze. De qualquer, forma se percebe que foram variáveis pertinentes para o tema em questão, e que muitas vezes não estiveram presentes possivelmente pela dificuldade de sua aquisição, como no caso dos hidrológicos, em que muitas vezes são necessárias coletas em áreas de difícil acesso e execução.

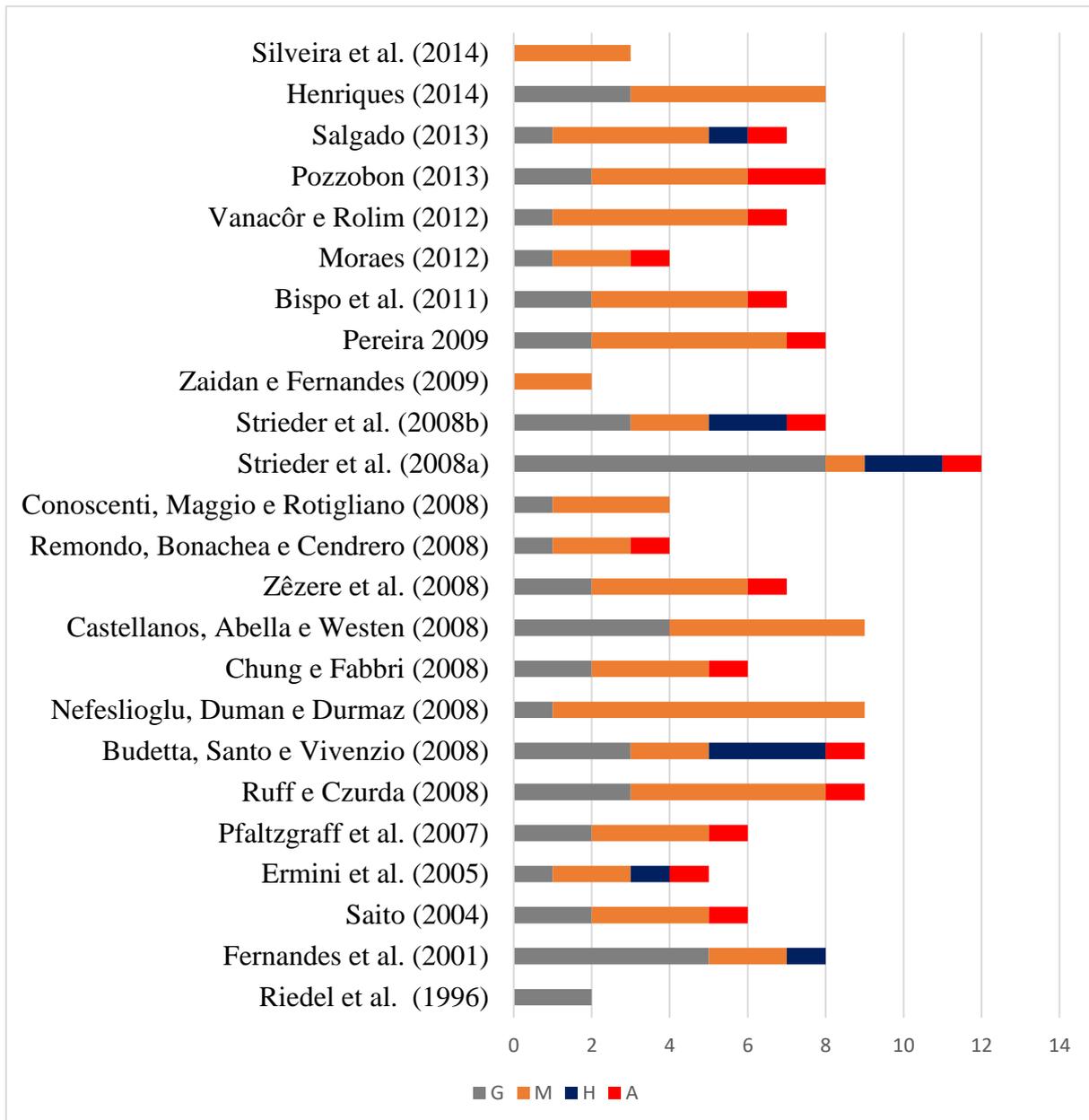
A Figura 18 contém um gráfico que resume as pesquisas analisadas nessa tese. Dos 24 trabalhos, somente cinco deles utilizaram a combinação de todos os parâmetros (geológicos, morfométricos, hidrológicos e antrópicos (uso)). Onze dos trabalhos utilizaram para seus modelos a combinação de fatores geológicos, morfológicos e antrópicos. Somente um deles

combinou variáveis referentes a fatores geológicos, morfométricos e hidrológicos. Quatro deles combinaram somente dois fatores (geológicos e morfológicos). Dois artigos utilizaram somente fatores morfométricos e um deles somente geológicos.

Percebe-se que os estudos de suscetibilidade destacam um ou mais eventos geológicos e como o terreno se comporta frente ao tipo de uso do solo. Conforme Souza (2015), dentro desta análise, devem ser avaliados os processos que podem ocorrer e os principais agentes deflagradores, independentemente da ocupação desses locais, pois os estudos de suscetibilidade visam avaliações mais gerais do meio físico, normalmente representando seus resultados em cartas e mapas. Teria, desta forma, um caráter qualitativo, mais voltado a uma análise macro, indicando assim as áreas mais propícias para usos e ocupações, assim como restrições, podendo ser de suma importância para a gestão de municípios, por exemplo.

As variáveis utilizadas para construção dos modelos são obtidas de dados de campo e também de imagens de satélite. Imagens como SRTM, ASTER e ALOS PALSAR são utilizadas para este tipo de estudo.

Figura 18 - Gráfico com os autores e fatores utilizados nos modelos de suscetibilidade.



Legenda: G = Fatores Geológicos M = Fatores Morfológicos H = Fatores Hidrológicos e A = Fatores Antrópicos.  
Fonte: Autor.

## 2.4 IMAGENS ALOS PALSAR: QUALIDADE E APLICABILIDADE

O satélite ALOS foi lançado em 24 de janeiro de 2006 pela Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA, no centro espacial de Tanegashima (Japão) e entrou na fase operacional e fornecimento de dados ao público em 24 de outubro de 2006, com uma órbita circular heliossíncrona a 692 km de altitude, com um período de revisita de 46 dias (IBGE, 2008). As

principais características que dão ao satélite uma boa confiabilidade são a grande velocidade e capacidade de tratamento de dados e a precisão avançada na determinação de seu posicionamento espacial, este último pelo fato de possuir um sistema de controle de órbita e atitude baseados em GPS de dupla frequência e rastreador de estrelas. O objetivo geral da operação era oferecer subsídios ao estudo de temas ligados ao desenvolvimento sustentável, monitoramento de desastres naturais e recursos naturais (EMBRAPA, 2013).

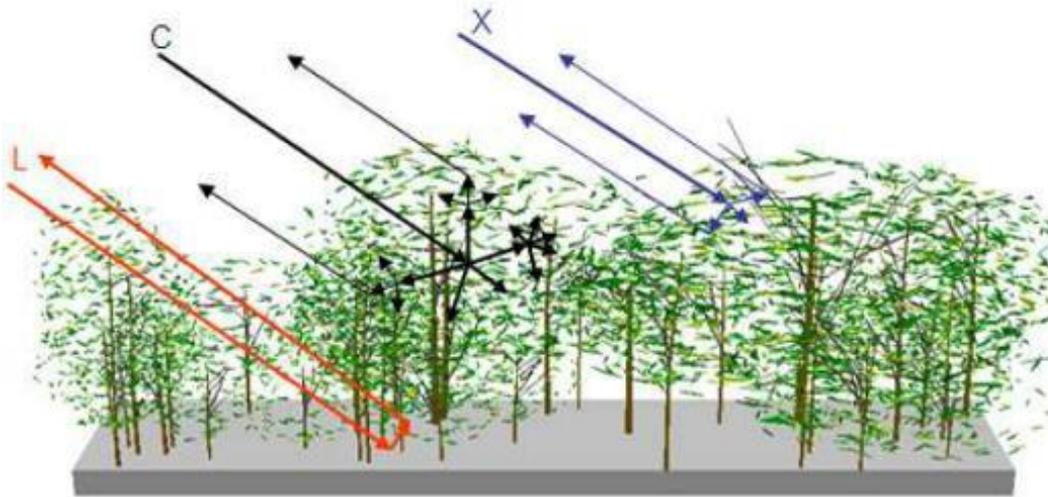
Três sensores estão à bordo do ALOS, são eles: o radiômetro PRISM (Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping), capaz de adquirir imagens tridimensionais detalhadas da superfície terrestre; o radiômetro multiespectral AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer-type 2), voltado aos mapeamentos de uso e cobertura das terras e o sensor de microondas PALSAR (Phased Array type Lband Synthetic Aperture Radar) capaz de obter imagens diurnas e noturnas sem a interferência de nebulosidade. Este último é o que terá destaque devido às suas características e usabilidade. O PALSAR é um radar de abertura sintética que opera na Banda L, capaz de obter imagens diurnas ou noturnas e em quaisquer condições atmosféricas. Com uma resolução espacial que varia de 10 a 100 metros, e três modos de imageamento: fino, ScanSAR e polarimétrico. Vale ressaltar que o sensor não consegue obter imagens em áreas localizadas acima de 87,8° de latitude Norte e 75,9° de latitude Sul (EMBRAPA, 2013).

Entre as principais aplicações das imagens ALOS estão: cartografia de precisão, elaboração de modelos digitais de superfície, planejamento urbano e regional, monitoramento de desastres naturais, levantamento de recursos naturais, mapeamento de uso e cobertura das terras, estimativa de biomassa, extração de dados topográficos por interferometria (EMBRAPA, 2013).

O radar é um sensor ativo que se baseia na utilização da energia eletromagnética na região das micro-ondas. A radiação emitida pelo radar não sofre interferência de fatores atmosféricos como nuvens ou poeira, permitindo o imageamento em condições meteorológicas adversas (JENSEN, 2007). Por este fato, os dados gerados pelo radar são de grande utilidade em ambientes tropicais, em decorrência da intensa cobertura de nuvens presentes nessas regiões em grande parte do ano (LIMA et al, 2009).

Os radares imageadores empregados em Sensoriamento Remoto trabalham com pulsos (retroespalhamento) que variam entre 1 e 100 cm de comprimento de onda, em que, quanto maior o comprimento de onda utilizado, maior a penetrabilidade da onda nos alvos (JENSEN, 2007). Com a Figura 19 pode-se compreender melhor a interação do espalhamento nas bandas utilizadas na identificação de alvos por sistemas de RADAR.

Figura 19 - Representação dos mecanismos de espalhamento na banda C (~5,6 cm), L (~23 cm) e X (~3 cm).



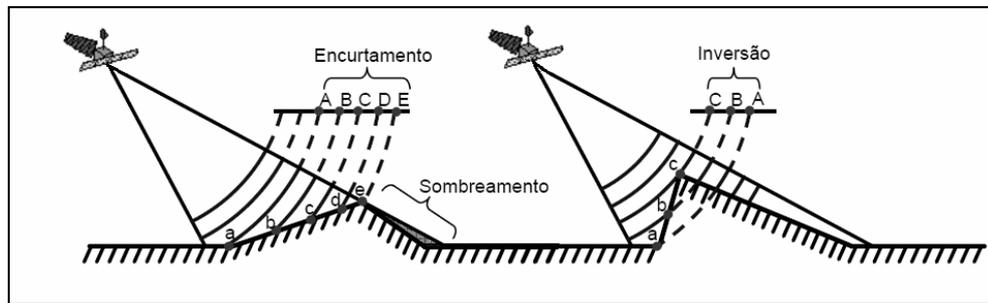
Fonte: (SERVELLO, 2010).

Apesar de já utilizadas há certo tempo, as imagens de radar ainda sofrem limitações no uso devido à escassez de técnicas, aplicativos e recursos humanos que considerem as particularidades do processamento desses produtos, seja por seus princípios dielétricos, distorções inerentes ou dificuldades em sua interpretação visual. Dentre suas distorções pode-se citar as geométricas, ligadas aos aspectos do relevo, e as radiométricas, dentre as quais se destaca o ruído *speckle* (SANTOS et al, 2017).

Entre alguns exemplos práticos de distorções geométricas provenientes do imageamento do radar, merecem destaque o encurtamento de rampa (*foreshortening*), a inversão de relevo (*layover*) e o efeito de sombra (*shadow*). Esses casos podem ser mais bem compreendidos na Figura 20.

Woodhouse (2006) comenta que o encurtamento de rampa é um tipo de distorção em terrenos declivosos, voltados para o feixe de iluminação do radar que são imageados como contendo uma compressão no sentido transversal da imagem. Desta forma, o eco da base do relevo é recebido antes do oriundo do topo, o que gera uma distância registrada na imagem menor do que a observada no terreno. O encurtamento de rampa é mais acentuado em declives íngremes e em imageamento com baixos ângulos de incidência.

Figura 20 - Exemplos de configurações geométricas que causam encurtamento de rampa, sombreamento e inversão de relevo nas imagens de radar.



Fonte: (PRADO, 2009 ADAPTADO DE ALMEIDA, 2008).

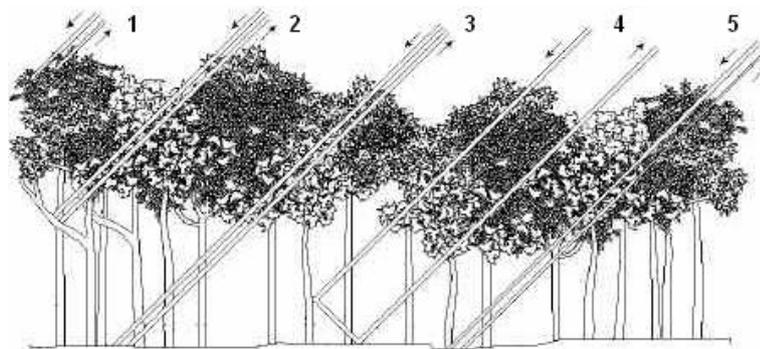
A inversão de relevo pode ser considerada como um caso extremo de encurtamento de rampa. Nesse tipo de distorção o topo do relevo se encontra mais próximo do radar do que as partes mais baixas, permitindo que o eco da base do alvo seja recebido pela antena posteriormente ao eco do topo. Essa característica gera imagens distorcidas na direção de imageamento, não podendo ser corrigida com os processos de ortorretificação. Por fim, o sombreamento de relevo é resultado de uma área não iluminada pelo radar e não visível na imagem resultante. Essa região não pode ser atingida pela radiação emitida e, conseqüentemente, não será imageada.

Destacando um pouco mais o problema do sombreamento em imagens ALOS PALSAR, percebe-se que as regiões mais escuras na imagem se tornam mais intensas em alvos mais afastados do sensor. Isso ocorre quando a iluminação dos feixes de radar estiver em uma orientação E-W ortogonal à direção das cristas. Assim, quando a iluminação é ortogonal à crista, a face voltada frontalmente ao pulso será intensamente iluminada e deverá ter um alto retorno do sinal, registrando um tom de cinza claro na imagem. Ao contrário, a face oposta será bem menos intensamente iluminada ou quase nada iluminada (sombreada), não havendo quase nada de retorno de sinal, e o registro será de uma imagem com tom de cinza escuro ou preto (MENESES E SANO, 2012).

A interferência da vegetação é uma preocupação bastante comum com imagens de satélite, e diversos parâmetros condicionam o imageamento desta temática. Neste contexto, Dobson et al. (1995) destacam que os principais fatores relacionados à interação entre o imageamento SAR (*Synthetic Aperture Radar*) e as florestas são a textura do dossel e do solo, a macrotopografia, a umidade do solo e da vegetação e a estrutura das formações vegetais.

Para Leckie e Ranson (1998) os principais mecanismos de espalhamento em floresta compreendem: (1) o retroespalhamento direto da copa, que ocorre com comprimentos de onda menores, principalmente com bandas K, X e C, e a interação é predominante entre folhas, ramos e pequenos galhos; (2) o retroespalhamento direto do tronco e de grandes galhos, existente para grandes comprimentos de onda, principalmente bandas L e P; (3) o retroespalhamento direto do solo, que é usualmente pequeno e ocorre apenas com a interação de grandes comprimentos de onda, principalmente banda P; (4) o retroespalhamento resultante da interação entre o tronco/solo ou solo/tronco, que são denominados do tipo *double bounce*, significativos apenas para grandes comprimentos de onda (bandas L e P), podendo se dar também, em menor intensidade, entre o solo/dossel ou dossel/solo; e (5) o retroespalhamento integrado entre tronco e solo, que acontece com baixa magnitude e especialmente em grandes comprimentos de onda, existindo contribuições do tronco e do solo concomitantemente. Para exemplificar as referidas situações, tem-se a Figura 21.

Figura 21 - Ilustração dos tipos e mecanismos de retroespalhamento em ambientes florestais.



Fonte: (PRADO, 2009 ADAPTADO DE LECKIE E RANSON, 1998).

É válido salientar que erros nas captações das imagens são comuns nos mais diversos tipos de sensores e processamentos. Diante disso, sensores de radar têm sido amplamente utilizados, como os de abertura sintética, a exemplo das imagens SRTM e ALOS. Em áreas de estudo com carência de dados altimétricos, parecem ser uma excelente opção. Assim, ao comparar as imagens disponíveis gratuitamente para a área de estudo da presente pesquisa, para a geração dos mapas temáticos que se fazem necessários, nota-se que a melhor resolução espacial encontrada é a das imagens ALOS PALSAR (12,5 metros). Análises pertinentes nesse sentido foram destacadas em Rocha et al. (2017).

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O recorte da área para a realização da pesquisa é a porção do Rebordo do Planalto, entre os municípios de Santa Maria e Candelária. Para melhor compreender a dimensão desta região dentro do estado do Rio Grande do Sul, tem-se a Figura 22.

Figura 22 - Localização da área do Rebordo do Planalto no Rio Grande do Sul. No retângulo, a área de estudo.



Fonte: (TRENTIN, ROBAINA E CRISTO, 2011).

Esta região em específico possui particularidades bastante interessantes e importantes de serem analisadas dentro do contexto da presente pesquisa. Conforme Trentin, Robaina e Cristo (2011), o Rebordo do Planalto é definido como o relevo escarpado, que evidencia o contato das “terras altas” do Planalto Vulcânico do Rio Grande do Sul com as “terras baixas” das rochas sedimentares da Depressão Central e, no extremo norte, da Planície Litorânea. Assim, de maneira geral, pode-se dizer que o relevo escarpado é a forma como se apresenta o

contato das rochas vulcânicas do planalto com as rochas sedimentares, em maior parte, da Bacia do Paraná.

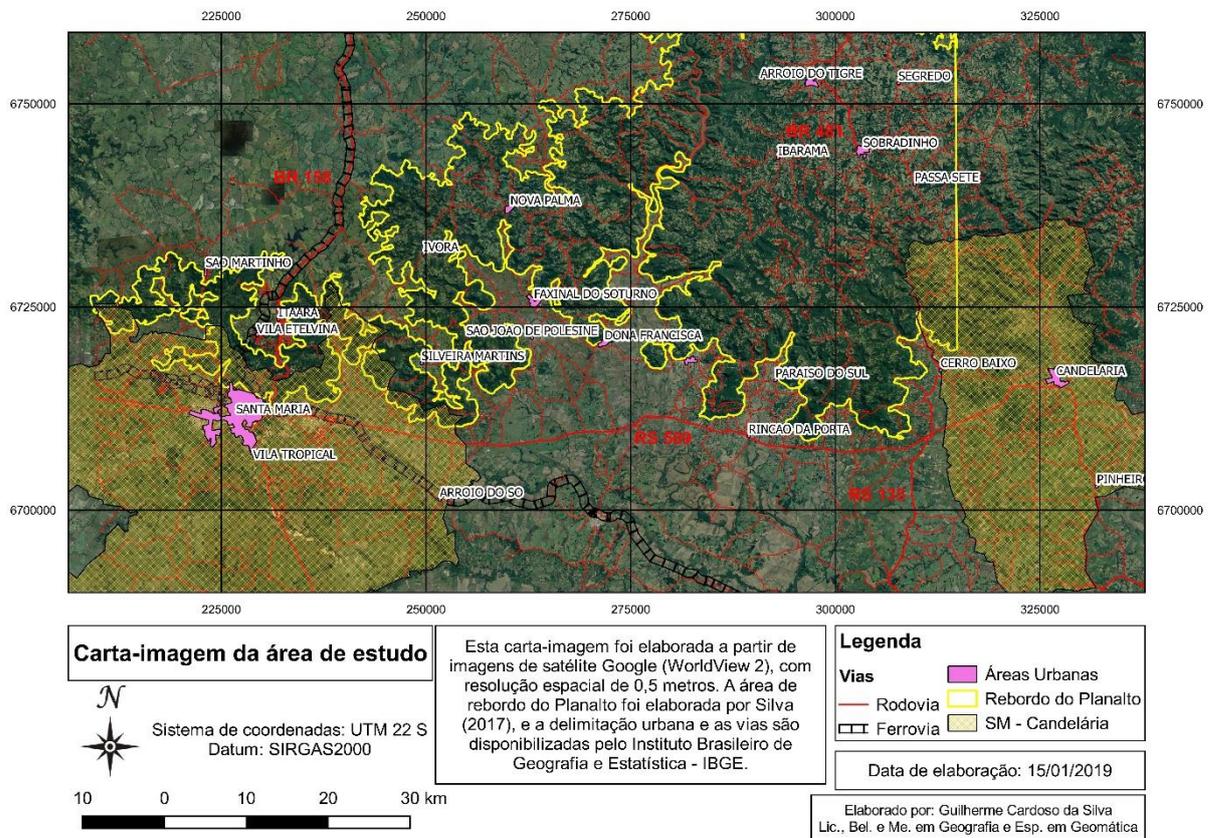
Trentin, Robaina e Cristo (2011) fizeram uma síntese dos aspectos que afetam a configuração do relevo do Rebordo do Planalto, sendo eles: a reativação das falhas e a ocorrência de fraturas que controlam o escoamento da rede de drenagem; a formação de um relevo constituído por patamares em degraus, originados pelos sucessivos derrames de lava; o retrabalhamento erosivo pela drenagem subsequente (paralela à direção das camadas) da depressão central periférica; a reativação erosiva da rede de drenagem por mudanças no nível de base e os movimentos de massa formando patamares coluvionais na base das vertentes.

Diante do contexto do presente trabalho, sabe-se que essas características de relevo citadas são propícias para o desenvolvimento de processos superficiais intensos nos taludes, tais como erosões e movimentos de massa. Conforme Trentin, Robaina e Cristo (2011), a região de borda do Planalto Vulcânico do Rio Grande do Sul apresenta características de um relevo poligenético, suscitado pela alternância de degradação lateral e pela erosão linear, ambas controladas por fatores litológicos, tectônicos e climáticos. Essa paisagem característica combina vertentes com declividades consideráveis, canais fluviais encaixados, surgências, processos superficiais acelerados e importante cobertura de vegetação florestal, responsáveis pela configuração atual.

A área de estudo do presente trabalho, abrange uma região que vai do município de Santa Maria a Candelária, no centro do estado do Rio Grande do Sul, em direção ao leste. O Rebordo do Planalto, possui cerca de 7.800 km<sup>2</sup> em sua totalidade, porém neste estudo a sua extensão apresenta uma área inferior a 3.000 km<sup>2</sup>, devido a distribuição dos escorregamentos encontrados. Muitos municípios estão presentes na referida delimitação, tais como: Santa Maria, Itaara, Restinga Seca, Dona Francisca, Faxinal do Soturno, Ivorá, Nova Palma, Agudo, Pinhal Grande, São João do Polêsine, Silveira Martins, Paraíso do Sul, Candelária, Passa Sete, Cerro Branco.

Alguns dos municípios citados fazem parte da Quarta Colônia, que é uma importante região criada no ano de 1877 com a chegada dos imigrantes italianos à região central do Rio Grande do Sul. A região teve como forte característica a remoção de florestas para dar espaço à agricultura, além da retirada de madeiras nobres, promovendo assim a exploração e ocupação da área. Na atualidade, a base econômica dos municípios da região é voltada à agricultura, principalmente ao cultivo da batata inglesa, fumo, milho e feijão (ITAQUI, 2002). Para melhor observar a área de estudo, elaborou-se o mapa da Figura 23, com imagens RapidEye do ano de 2011, com resolução espacial de 5 metros.

Figura 23 - Carta-imagem da área de estudo (satélite RapidEye).



Fonte: Autor.

Com relação à litologia da área de estudo (CPRM, 2003), destacam-se as rochas sedimentares das Formações Sanga do Cabral (arenito/conglomerado) e Santa Maria (arenitos e lamitos) na base da sequência estratigráfica, e sob estas as Formações Caturrita (arenito/pelitos) e Botucatu (arenito fino/quartzo arenito), ambas recobertas por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. A Formação Serra Geral é composta por basaltos e latitos (primeiros derrames) da Fácies Caxias e riodacitos e quartzo latitos da Fácies Gramado. Localmente podem ocorrer discordâncias de não conformidade (as rochas da Formação Botucatu não depositaram ou foram erodidas) onde as rochas ígneas vulcânicas da Formação Serra Geral ocorrem sobre a Formação Caturrita.

As rochas da Formação Botucatu também ocorrem como *intertrapp* nos primeiros derrames da Formação Serra Geral e sobre estas ocorrem as rochas da Formação Tupanciretã (arenitos). Recobrando estas rochas, nas vertentes, ocorrem depósitos sedimentares recentes como colúvios, tálus e alúvios (areia/areia arcoseana), estes últimos junto aos cursos de água da região (Figura 24).

Com relação ao solo, em uma escala de trabalho de 1:250.000 (IBGE, 2003), destacando-se, principalmente, os seguintes tipos de solo: Argissolos (amarelo alítico típico e bruno acinzentado alítico abrupto), Cambissolos (háplico eutrófico típico), Neossolos (litólico distro-úmbrico e regolítico húmico lépco ou típico) e Planossolos (háplico eutrófico arênico), conforme a Figura 25.

Os Argissolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico na maior parte do horizonte B (SiBCS, 2018). Na área de estudo, os Argissolos estão presentes em hipsometrias menores, ao sul do Rebordo do Planalto, e hipsometrias mais elevadas, na face norte da área do Rebordo. Em ambas as situações, não presenciam declividades muito acentuadas.

Os Cambissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial (exceto hístico com 40 cm ou mais de espessura) ou horizonte A chernozêmico, quando o B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases alta (SiBCS, 2018). Na área de estudo são pouco representativos, correspondendo a baixas altimetrias e declividades, em uma porção leste da face sul.

De forma semelhante, os Neossolos litólico distro-úmbrico não são muito representativos na área estudo, estando presentes em uma pequena porção na face norte na porção oeste. Assim como os Cambissolos, correspondem a áreas de baixas hipsometrias e declividades. Já os Neossolos regolítico húmico lépco ou típico foram bastante representativos na porção interna do Rebordo do Planalto, correspondendo a diferentes hipsometrias e declividades. Conforme o SiBCS (2018), os Neossolos são solos pouco evoluídos constituídos por material mineral ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Horizontes glei, plântico, vértico e A chernozêmico, quando presentes, não ocorrem em condição diagnóstica para as classes Gleissolos, Plintossolos, Vertissolos e Chernossolos, respectivamente.

Por fim, os Planossolos também não foram muito expressivos na porção interna do Rebordo do Planalto, estando presentes nas proximidades da face sul, correspondendo mais fortemente com hipsometria e declividades menos expressivas. Conforme o SiBCS (2018), os Planossolos são solos constituídos por material mineral com horizonte A ou E seguidos de horizonte B plânico. Horizonte plânico sem caráter sódico perde em precedência taxonômica para o horizonte plântico.

Figura 24 - Mapa litológico da área de estudo.

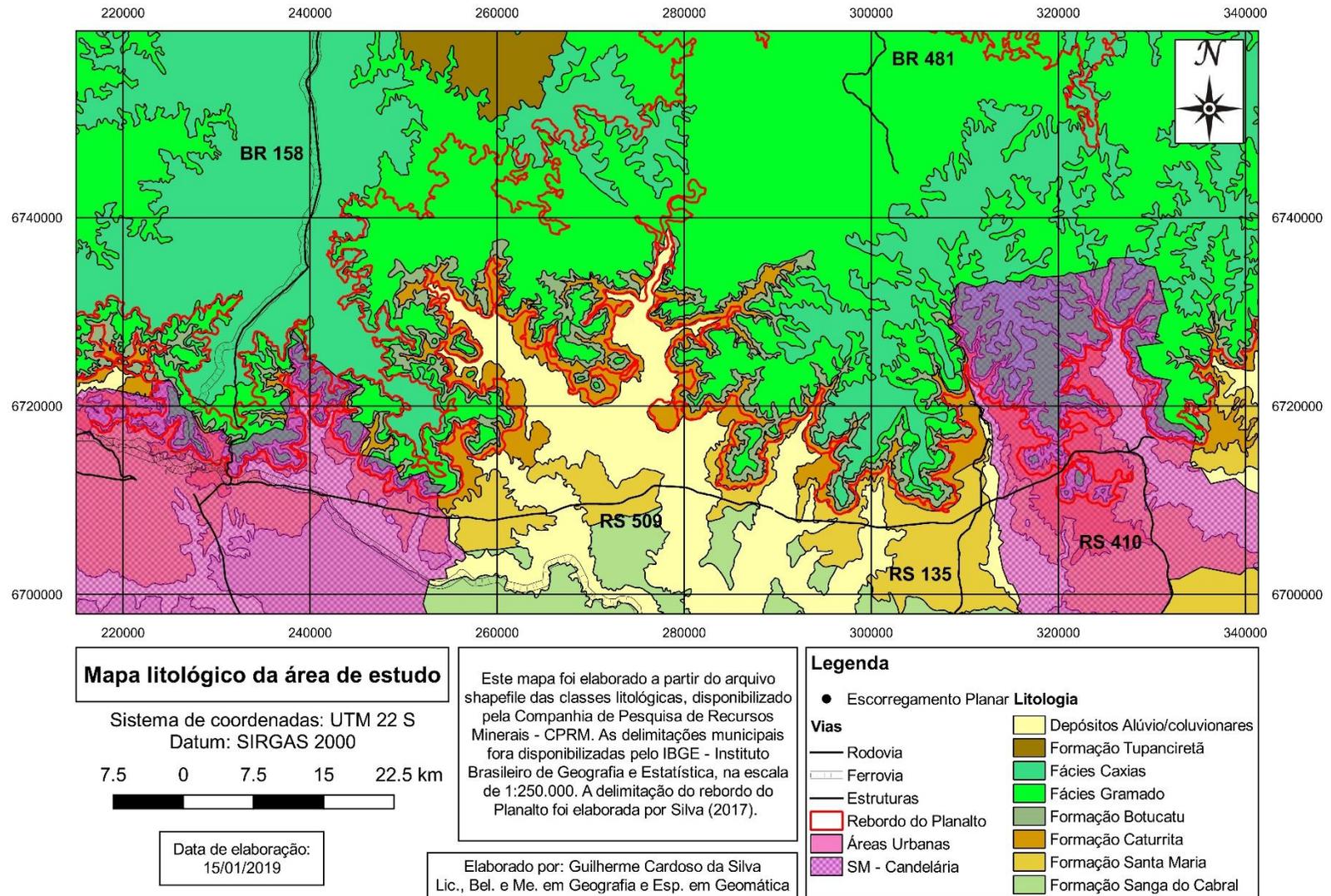
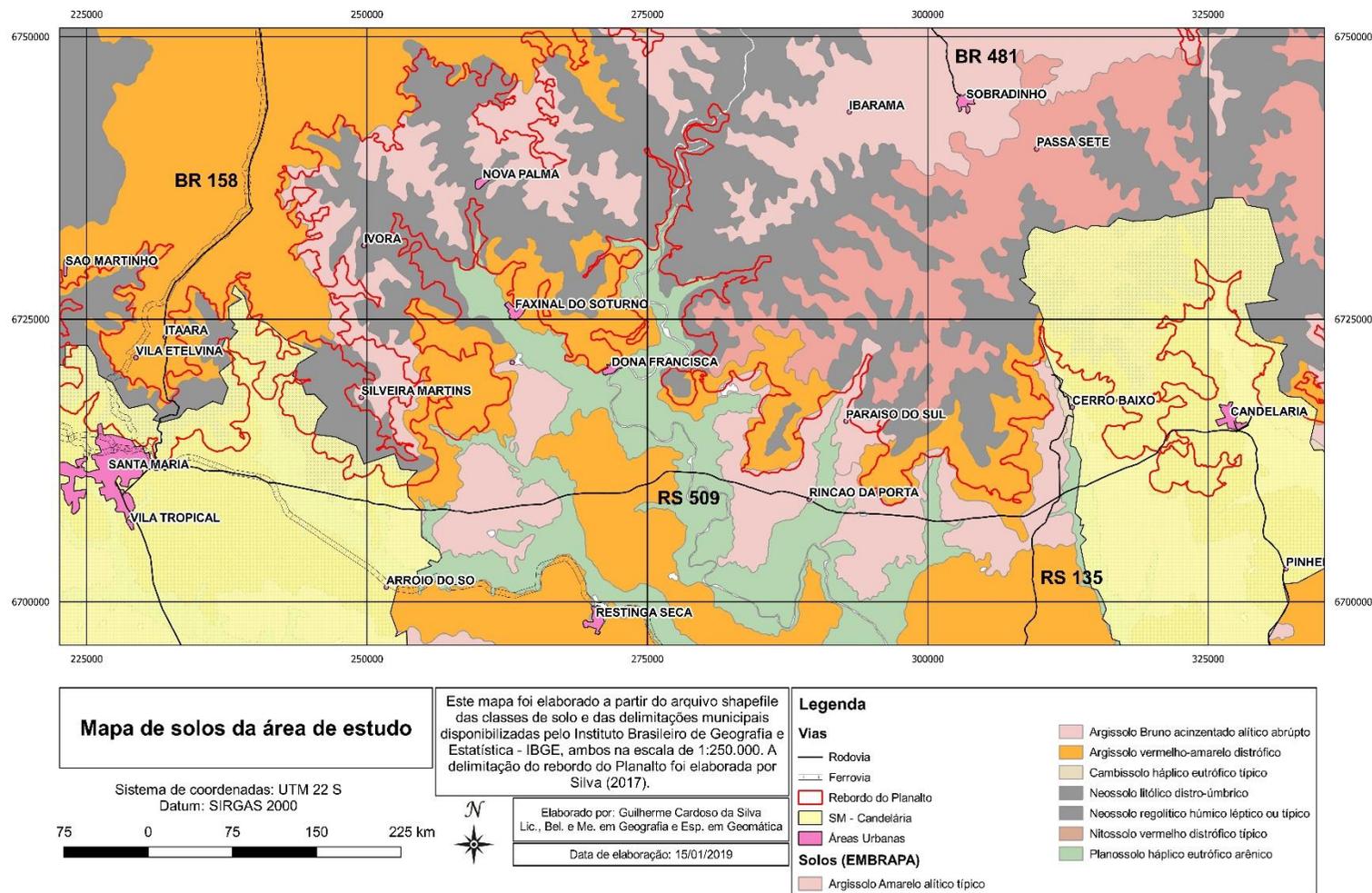


Figura 25 - Mapa de solos da área de estudo.



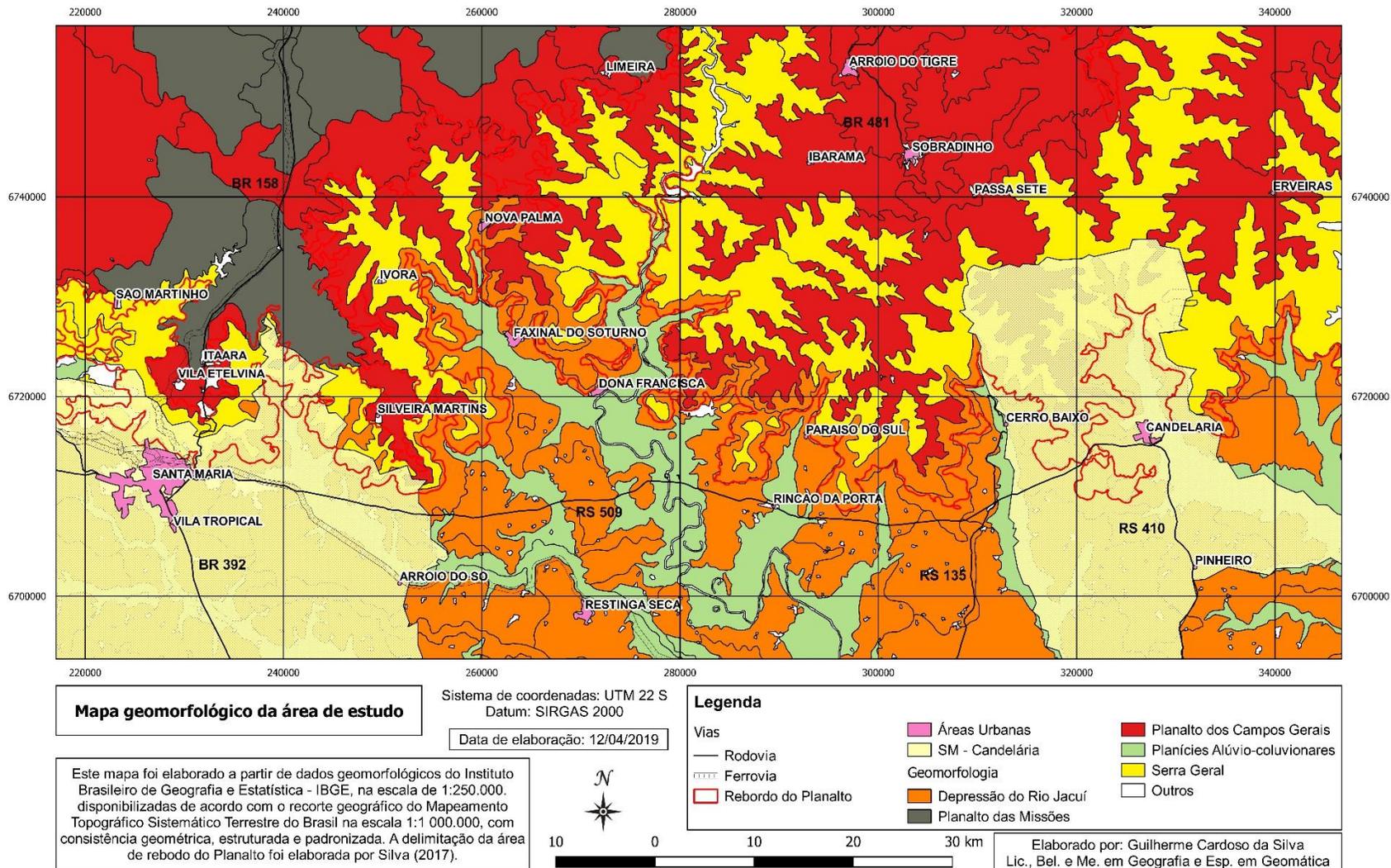
Também se considerou relevante a análise da geomorfologia da área de estudo. Desta maneira, de acordo com dados do IBGE (2003), disponibilizadas conforme o recorte geográfico do Mapeamento Topográfico Sistemático Terrestre do Brasil na escala 1:1.000.000, com consistência geométrica, estruturada e padronizada para uso em Sistemas de Informação Geográfica sobre o tema da geomorfologia, elaborou-se o mapa da Figura 26. Cabe destacar que, de acordo com o próprio instituto, o mapa final corresponde a uma escala de 1:250.000, e visivelmente possui uma boa relação com a delimitação da área de estudo, esta que, apesar de não levar em consideração diretamente a geomorfologia em sua delimitação, utilizou-se de dados de hipsometria e declividade, que são temáticas fortemente relevantes em dados geomorfológicos.

Também é pertinente comentar que a escala de 1:250.000, apesar de não apresentar um nível de detalhamento tão elevado, é bastante compatível com outros mapeamentos, como exemplo o de solos, que possui exatamente a mesma escala. Apesar de apresentar uma série de unidades geomorfológicas, destacam-se aqui as três principais presentes na área de estudo: Depressão do rio Jacuí, Serra Geral e Planalto dos Campos Gerais (nessa ordem a partir da face sul em direção a norte).

A Depressão do Rio Jacuí tem como característica um relevo sem grandes variações altimétricas, apresentando colinas de topos convexos, conhecidas como coxilhas, e alguns morros testemunhos. Está localizada na porção sul da área de estudo, próxima das áreas mais planas. A altitude média deste compartimento é de 63 m, e 90% desta classe apresenta altitudes entre 19 e 107 m. Quanto às declividades, 90% da área da depressão apresentam declividades inferiores a 14,5%, sendo o valor médio de 5,7% (OLIVEIRA et al., 2015).

A Serra Geral constitui-se nos terminais escarpados abruptos dos Planaltos das Missões e das Araucárias, desenvolvidos sobre rochas efusivas básicas. O relevo é propício ao desenvolvimento e preservação da vegetação florestal, tais como a Floresta Ombrófila Densa, Floresta Estacional Semidecidual e Estacional Decidual. As formas do relevo apresentam-se bastante abruptas com vales fluviais bem aprofundados (muitas vezes superiores a 400 m de desnível) e muitos topos de morros angulares ou estreitos. O limite superior da classe da Serra Geral é definida pelas linhas de escarpa erosiva. Ainda pode-se dizer que a Serra Geral apresenta uma altitude média de 486 m, sendo que 90% dela apresentam altitudes entre 160 e 810 m. Quanto às declividades, 90% da área serrana apresentam declividades inferiores a 50,6%, sendo o valor médio de 27,2% (OLIVEIRA et al., 2015).

Figura 26 - Mapa geomorfológico da área de estudo.



O Planalto dos Campos Gerais apresenta-se recortado pelas áreas escarpadas da Serra Geral, fragmentada algumas vezes por áreas de relevo mais dissecado. A unidade caracteriza-se por um relevo de plano a ondulado, representada por topos de morros tabulares em grande maioria. As formas do relevo demonstram a ocorrência de processos evolutivos de dissecção, observando-se áreas bastante conservadas de morfologia planar, outras em que os processos erosivos deixaram rupturas de declive ou evidencia-se o alargamento de vales, deixando resíduos da antiga superfície de aplainamento. Esta unidade também apresenta uma sucessão de colinas e pequenos morros, separadas por amplos vales de fundo achatado, atualmente, cobertos pela cobertura vegetal dos campos. Também é válido destacar que esta classe possui uma área de 15.221 km<sup>2</sup>, com uma altitude média de 768 m, sendo que 90% dela apresenta altitudes entre 513 e 1.022 m. Quanto às declividades, 90% da área deste planalto apresentam declividades inferiores a 23,9%, sendo o valor médio de 10,6% (OLIVEIRA et al., 2015).

Nos trabalhos de campo realizados durante os estudos da aluna Angéli Aline Behling, em sua dissertação de mestrado em geografia de 2017, foram identificados sete movimentos de massa do tipo escorregamento planar. Estes processos foram identificados de forma mais detalhada, trazendo algumas respostas prévias com relação as características das vertentes nas quais estavam inseridas. Levando em consideração que a pesquisa foi realizada no município de Agudo, é pertinente a relação com o presente estudo.

Conforme Behling (2017), todos os escorregamentos planares encontram-se em rochas sedimentares que, conforme a autora, correspondem a Formação Caturrita e em solos do tipo Neossolos Litólicos Chernossólicos. Com relação à hipsometria, os escorregamentos planares ocorriam nas seguintes altimetrias: 391, 201, 402, 429, 226, 159 e 151 metros. Os valores de declividade eram variados: 86%, 65,5%, 89,2%, 68%, 39,1%, 26,9% e 42,2%. Com relação à forma do perfil e plano de curvatura da vertente, 3 deles ocorriam estavam presentes em vertentes côncavo-convergentes, 2 em côncavo-divergentes e 2 em convexo-convergentes. Por fim, a autora ainda fez uma análise quanto ao uso e ocupação, que indicou que todos os escorregamentos planares estavam localizados em áreas cobertas por vegetação arbórea.



## 4 METODOLOGIA

Esta etapa da pesquisa apresenta os procedimentos e técnicas que foram utilizadas para a elaboração do modelo de suscetibilidade a escorregamentos planares.

### 4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados se constituem das cartas topográficas do Exército Brasileiro, na escala de 1:50.000; a base cartográfica digital do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, na escala original de 1:250.000, com arquivos no formato *shapefile* dos Setores Censitários para todos os municípios da área de estudo; o mapa pedológico disponibilizado pela mesma instituição; o mapa geológico disponibilizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM na escala de 1:750.000, além do mapeamento realizado em melhor escala (1:100.000) para alguns municípios da Quarta Colônia; base de dados em meio digital, disponibilizadas de acordo com o recorte geográfico do Mapeamento Topográfico Sistemático Terrestre do Brasil na escala de 1:250.000, com consistência geométrica, estruturada e padronizada para uso em Sistemas de Informação Geográfica sobre o tema da Geomorfologia, disponibilizado pelo IBGE; imagens do satélite RapidEye na resolução espacial de 5 metros, disponibilizadas pelo Ministério do Meio Ambiente – MMA; imagens ALOS – PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) com resolução espacial de 12,5 m, disponíveis no *site* da ASF - Alaska Satellite Facility e arquivo no formato *shapefile* da área de Rebordo do Planalto no estado do Rio Grande do Sul, elaborado por Silva (2017).

Foram realizados os *downloads* de imagens ALOS PALSAR, com 12,5 metros de resolução espacial, em que foram necessárias seis cenas para compor toda a área de estudo, e posteriormente, foi elaborado um mosaico, unindo as imagens. A partir de então, elaborou-se um retângulo máximo da área de estudo, visando realizar o corte da imagem. Por fim, alterou-se o sistema de coordenadas original das imagens, WGS 84, para o que seria utilizado na presente pesquisa, o sistema SIRGAS 2000/UTM 22 S. Para finalizar o tratamento deste dado, fundamental para as etapas seguintes da pesquisa e também o êxito na técnica do Valor Informativo, utilizou-se da ferramenta *Fill*, no *software* ArcGIS, visando preencher pequenas imperfeições no dado, removendo vazios e sutis “depressões” consideradas como erros da imagem. A partir disso, pôde-se compor toda a altimetria da área de estudo, além de permitir a elaboração dos mapas considerados fundamentais para a elaboração do modelo de áreas suscetíveis a movimentos de massa, com base na literatura estudada.

Com o intuito de escolher o melhor produto a ser utilizado para a presente pesquisa, primeiramente havia sido realizado o mosaico da área de estudo com imagens SRTM (1 arco de segundo) com a resolução espacial de 30 metros. Também foram gerados modelos digitais de elevação a partir de dados disponibilizados pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, na escala de 1:50.000. Para tanto foi utilizada a ferramenta *Topo to Raster*, do pacote *3D Analyst* do *software* ArcGIS.

A partir dos dados topográficos (imagens ALOS PALSAR) foi possível gerar os mapas de hipsometria, declividade, orientação de vertente, curvatura em plano e em perfil, plano e perfil de curvatura relacionados, direção de fluxo (D8, D-Infinity e *Flow Accumulation*) e Índice de Umidade Topográfica (TWI). Posteriormente foram testadas as relações entre os escorregamentos encontrados em campo e imagens de satélite (grupo de estimacão) e os mapas temáticos, colaborando para a escolha das variáveis mais representativas, mesmos antes da aplicação da técnica do Valor Informativo.

Nos trabalhos de campo foram utilizados um receptor de GPS modelo Garmim Legend H, máquina fotográfica, iPad, Smartphone e bloco de anotações para realizar o levantamento das cicatrizes dos movimentos de massa, além de outras análises voltadas, principalmente, à geologia e avaliação de perfil e plano de curvatura das vertentes.

Para classificação, caracterização e descrição dos fatores envolvidos nos movimentos de massa foi utilizada a Norma Técnica ABNT NBR 11682 (Estabilidade de Encostas, 2ª edição 21/08/2009), publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. Vale ressaltar que este documento sofreu modificações visando se adaptar aos objetivos desta pesquisa (ABNT, 2009).

Os *softwares* utilizados foram o GPS Track Macker, Google Earth Pro, GeoSetter, QGIS 2.18, ArcGIS 10.4, SAGA GIS 2.3.2, Excel e Cmap Tools. O GPS Track Macker foi um *software* que auxiliou no *download* dos pontos coletados em campo com o uso do receptor de GPS. O Google Earth Pro auxiliou em diversos momentos da pesquisa, sendo que entre as principais atividades destacam-se a busca por cicatrizes de movimentos de massa em diferentes datas, a elaboração de um arquivo *shapefile* com estruturas geológicas da área de estudo nas proximidades das cicatrizes de escorregamentos, a conferência de melhores rotas para visitas a campo para a tomada de fotografias de cicatrizes de movimentos, além da melhor compreensão da vertente em questão e também a elaboração de perfis de elevação para conferência com outros dados, como imagens de satélite ALOS PALSAR.

O GeoSetter foi um *software* importante, principalmente como um complemento à utilização do Google Earth Pro, visto que é um programa que auxilia nas rotas a campo, e

permitiu o fácil acesso e relação entre um ponto marcado com o receptor de GPS e fotografias de vertentes, com ou sem cicatriz de movimento de massa.

O QGIS, o ArcGIS e o SAGA GIS foram amplamente utilizados em praticamente todo o período de elaboração da tese, com as mais diversas aplicações, como a elaboração dos mapas de caracterização da área, a confecção de novos dados em mapas que utilizaram das imagem do ALOS PALSAR, e também sendo de grande valia pela gama de imagens de satélite disponibilizadas de maneira *online* nos dois primeiros *softwares* citados. O Excel foi relevante na elaboração de gráficos, tabulação de dados em geral, tratamento dos dados estatísticos e cumpriu um importante papel na aplicação da técnica do Valor Informativo.

## 4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método utilizado nesta pesquisa foi o dedutivo, com abordagem sistêmica, com análise estatística bivariada, e o método do Valor Informativo. Para melhor compreender as diferentes etapas metodológicas da pesquisa, elaborou-se o fluxograma da Figura 27.

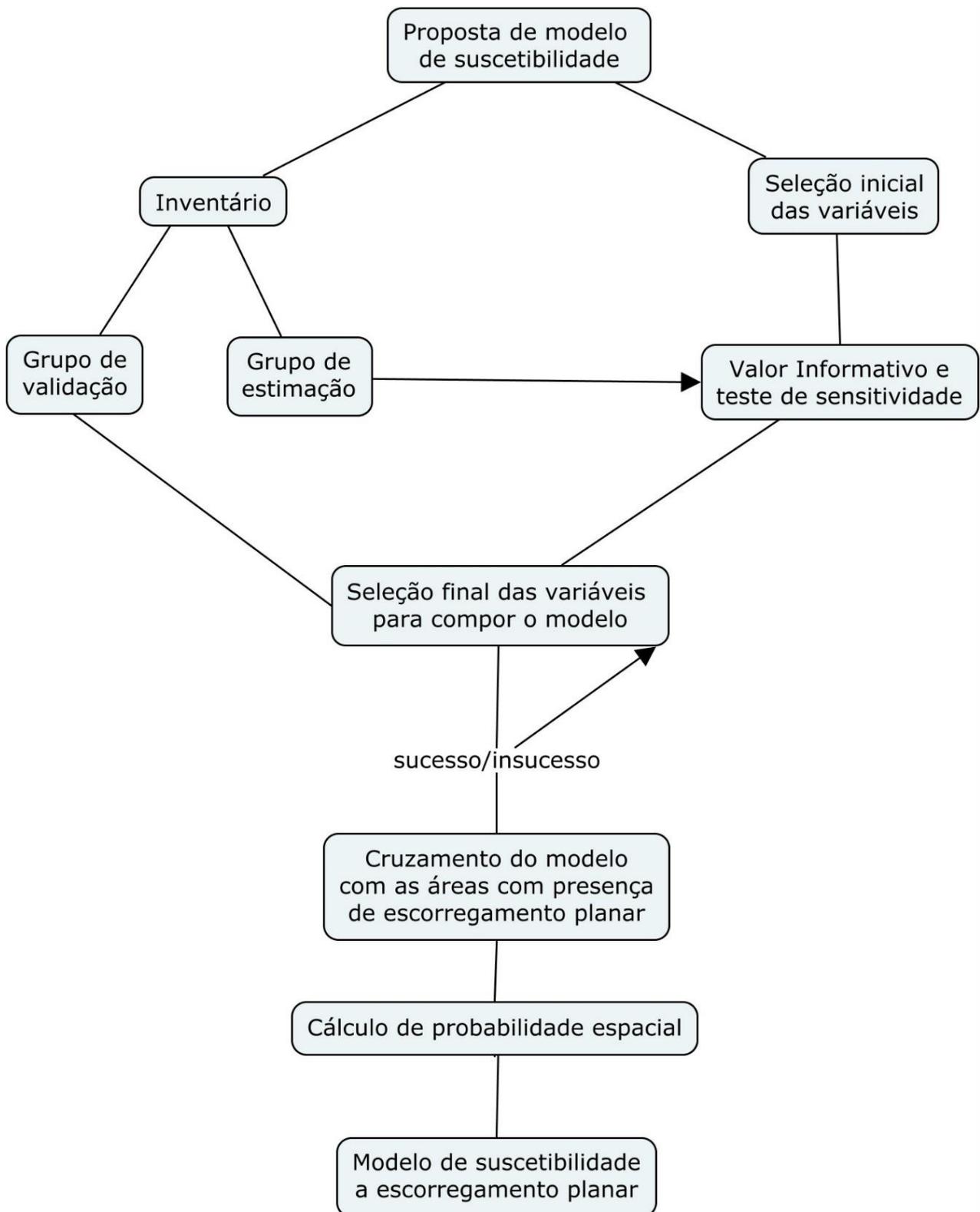
### 4.2.1 Levantamento bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi uma importante etapa na pesquisa, pois neste momento foram definidos conceitos importantes sobre o tema da tese e os procedimentos metodológicos desenvolvidos. O contato com o referencial bibliográfico ocorreu durante todo o desenvolvimento da pesquisa, visto que novas concepções foram relevantes ao longo da pesquisa.

Foi realizado um levantamento da bibliografia para construção do referencial teórico relativo aos seguintes temas: i) movimentos de massa, conceitos, classificações e variáveis controladoras; ii) modelos de suscetibilidade e exemplos de estudos de caso; iii) estudos anteriores referentes à área de pesquisa e que serviram para a sua caracterização e iv) estudos voltados à técnica do Valor Informativo.

O levantamento de estudos de casos de suscetibilidade, tanto na literatura nacional quanto internacional, se deu com o objetivo de avaliar quais seriam as variáveis utilizadas por diferentes autores na elaboração de seus modelos. Foram utilizados, fundamentalmente durante os primeiros anos da pesquisa, uma série de livros abordando os temas relacionados à pesquisa, artigos científicos nacionais e internacionais, dissertações e teses, normas técnicas, entre outros tipos de materiais teóricos que deram suporte às análises realizadas neste estudo.

Figura 27 - Modelo conceitual da pesquisa



#### 4.2.2 Seleção das Variáveis

As possibilidades de escolha das variáveis utilizadas em modelos de suscetibilidade são inúmeras, e cabe aos pesquisadores realizar a seleção das que melhor representam a área de estudo dentro do contexto da modelagem a que se propõe. Essa tarefa não é simples, e é fundamental para o resultado do trabalho. Para tanto, as variáveis que foram analisadas na presente pesquisa levaram em consideração uma série de trabalhos que elaboraram modelos preditivos para avaliar a suscetibilidade a movimentos de massa.

Basicamente a seleção das variáveis deve considerar três requisitos, são eles: Importância, Discriminação e Consistência. Nesse contexto a Importância se dá de acordo com os processos mais significativos para a área de estudo pelos mapas-critério e sua hierarquia, e isso depende fortemente do embasamento teórico-metodológico. Esse item visa responder quais as variáveis são viáveis e úteis para a pesquisa.

A Discriminação está relacionada ao poder que cada mapa-critério possui para discriminar os espaços, e isso depende diretamente da escala dos dados utilizados, e deve responder se uma variável, mesmo que julgada relevante, é capaz de hierarquizar áreas do modelo. Quanto maior a sua variabilidade espacial, mais útil ela é para a discriminação. Já a Consistência visa a relação entre os produtos da análise multicritério e o que é observado em campo, ou seja, se o que é visto no SIG é compatível com a realidade. Isso colabora com a definição do grau de certeza do modelo (UNIPAMPA/UFSM, 2011).

Com base nos trabalhos avaliados no referencial teórico acerca de modelos de suscetibilidade, foi realizado um levantamento das variáveis utilizadas. Estas foram agrupadas em 4 fatores: geológicos, morfológicos, antrópicos e hidrológicos na intenção de compreender quais foram as mais utilizadas e quais seriam os fundamentais para a elaboração dos modelos de suscetibilidade.

Como resultado, percebeu-se que no fator geológico há um grande número variáveis utilizadas, dentre as que se sobressaem: litologia (36%), comportamentos dos materiais (26%), discontinuidades (12%), solos (10%), presença de depósitos superficiais e característica dos materiais (8%). Algumas variáveis foram agrupadas para evitar um número pouco representativo, como no caso de falhas, foliações e lineamentos, que foram classificados como discontinuidades. Foram classificados como comportamento dos materiais: espessura do colúvio (depósito superficial); solo drenado e saturado, densidade natural, índice de instabilidade, condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e coesão e, por fim,

espessura do solo, densidade e coesão, que foram classificados como características dos materiais.

No fator morfológico, amplamente utilizado na maioria das pesquisas, observou-se um grande destaque da variável declividade, com 29% do total, seguido do perfil de curvatura (16%), orientação de vertente (14%), plano de curvatura e geomorfologia (9%), hipsometria (6%), além de outras variáveis menos expressivas.

Os fatores hidrológico e antrópico são menos expressivos nos trabalhos analisados, assim, destaca-se a intensidade de chuvas e a densidade de drenagem, com 20%, tendo o restante das variáveis a representatividade de 10%, sendo elas nível freático e água subterrânea, área de contribuição a montante, intensidade da chuva, gradientes hidráulicos, densidade da água e movimentação de ondas.

No fator antrópico foi comum a utilização de imagens de satélite ou fotografias aéreas para a geração de mapas de uso e cobertura da terra ou solo (72%) e de vegetação (28%).

Com base nas análises apresentadas e nas características da área estudada, optou-se por selecionar as seguintes variáveis para a elaboração do modelo preditivo de suscetibilidade a escorregamento planar: litologia, solos, geomorfologia, hipsometria, declividade, perfil e plano de curvatura, orientação de vertente e direção de fluxo. A escolha destas variáveis foi reforçada nos trabalhos de campo preliminares em busca de cicatrizes de escorregamentos planares. A variável TWI (Índice de Umidade Topográfica) também foi utilizada.

Desta forma, os dados apresentados pela bibliografia e os trabalhos de campo foram fundamentais para a seleção das variáveis que compuseram o modelo de suscetibilidade elaborado nesta tese.

Cabe destacar que em áreas que são identificadas como potenciais para escorregamentos planares, é muito importante o mapeamento para caracterização das formações (depósitos) superficiais. Para Macedo e Bressani (2013) é importante levar em consideração colúvio, aluvião, solo residual, entre outros, visto que esses tipos de formações costumam interferir fortemente para as movimentações.

#### 4.3 MÉTODO QUANTITATIVO: ANÁLISE ESTATÍSTICA BIVARIADA - TÉCNICA DO VALOR INFORMATIVO

No Brasil há uma carência de dados e muitas vezes, quando estão disponíveis não possuem uma escala adequada para estudos de detalhe. Nesta pesquisa, o modelo de suscetibilidade foi gerado com um baixo número de escorregamentos (com relação à extensão

da área de estudo) quando comparado a outros estudos. Estas justificativas se mostram como um desafios para esta pesquisa e na escolha do modelo quantitativo para elaborar um mapa de suscetibilidade a escorregamentos planares.

Os métodos quantitativos tratam-se de procedimentos mais avançados dentro da elaboração de modelos de suscetibilidade e, conseqüentemente, merecem mais cautela nos procedimentos. Como apresentado no fluxograma da Figura 27, se utilizou do inventário de movimentos de massa, da estatística bivariada (Valor Informativo) e de análises realizadas em laboratório por meio de técnicas digitais de geoprocessamento.

Como método de elaboração do modelo de suscetibilidade foi utilizado o método do Valor Informativo, que relaciona os escorregamentos com cada fator condicionante e avalia a importância relativa de cada classe na instabilidade desse fator. Assim, pôde-se avaliar a importância de cada variável nos escorregamentos planares. O objetivo desta escolha se dá pela possibilidade de desfazer a subjetividade das ponderações que dependem excessivamente da experiência do operador. Este método tem apresentado bons resultados de acordo com a literatura analisada, além de possuir uma aplicação mais simples, se comparada com outros métodos desta classificação. Assim, foram atrelados *scores* de suscetibilidade a cada variável escolhida, a partir da aplicação do método estatístico, com o uso do geoprocessamento em ambiente SIG, em que os mapas foram convertidos para unidades matriciais quando necessário.

O uso de dados matriciais foi fundamental para a aplicação do método, visto que toda a análise é realizada *pixel a pixel*, e a realização dos processamentos finais foi possível após inúmeros estudos, análises e testes, visando a melhor resolução frente à realidade da presente pesquisa. Os primeiros testes foram realizados com a delimitação da área de Rebordo do Planalto, alterada posteriormente devido à melhora com relação ao resultado dos processamentos. O recorte para uma área menor se deu devido ao fato de, mesmo com cicatrizes de escorregamento, este se torna um valor muito baixo quando a área apresenta uma extensão muito grande.

Para a validação do modelo foi utilizada uma parte dos escorregamentos levantados na área de estudo, que não foi utilizada para a elaboração do modelo. Isso permitiu analisar o montante dos escorregamentos conhecidos na região, avaliar o papel de cada mapa temático utilizado na construção do modelo, avaliar a capacidade do modelo em assimilar as variações nos dados de entrada, e, por fim, determinar o erro associado às classes de susceptibilidade estimadas. Desta forma, foi possível calcular a frequência de distribuição, relacionando os valores de suscetibilidade com as áreas afetadas por escorregamentos e com as áreas estáveis. A partir desta distribuição de frequências, foi calculada a percentagem de movimentos de massa

encontrados nas áreas preditas como instáveis, e isso dá o nível de assertividade do modelo elaborado.

A partição dos movimentos de massa utilizados para a elaboração do modelo de suscetibilidade e para a validação foi realizada de forma aleatória no *software* ArcGIS, com a utilização da ferramenta *Subset*, em *Create feature subset*. Desta forma, não se trata de uma partição espacial, nem temporal, e sim, aleatória, em que se divide a população de escorregamentos em dois grupos (1 e 2), em que cada um representa 50% da população total.

Por fim, foi analisada a curva de sucesso do modelo a partir de seu traçado e das Áreas Abaixo da Curva (AAC). Dependendo dos resultados obtidos, mudanças poderiam ser implementadas na metodologia, visando alterações no modelo para o seu refinamento. Comumente, os valores de acerto a partir de 75% são considerados satisfatórios, desta maneira, a retirada ou inserção de variáveis não estavam descartadas, assim como posteriores mudanças na estipulação de pesos dentro das análises da modelagem. Com um resultado satisfatório, foi gerado um mapa com diferentes classes de suscetibilidade a escorregamentos planares. Os VIs de cada variável se deram com base no inventário das cicatrizes e na compreensão dos fatores que condicionaram esses processos.

#### **4.3.1 Inventário**

O inventário dos escorregamentos planares se deu primeiramente observando imagens de satélite do *software* Google Earth Pro, de diferentes períodos de obtenção (2010 - 2019), ainda sendo possível a visualização em imagens RapidEye (dos anos de 2011, 2012 e 2013) e imagens da base de mapas do ArcGIS, DigitalGlobe (imagem WorldView 2, com 0,5 metros de resolução espacial), fundamentalmente das datas de 14/01/16, 18/03/16, 10/08/17 e 29/07/17. Um processo semelhante ocorreu no QGIS, com a conferência em imagens *online* a partir da ferramenta Openlayers Plugin e principalmente QuickMapServices, com imagens Bing Satellite, Google Satellite, ESRI Satellite e Yandex Satellite, de diferentes datas a partir dos anos 2010.

A utilização desta gama de imagens se justifica pela diferença na resolução dos produtos e as diferentes datas, pelo fato de possibilitar identificar o maior número possível de cicatrizes de escorregamentos planares. Foi assim elaborado um arquivo *shapefile* referente ao inventário de cicatrizes, primeiramente com uma camada *shapefile* de pontos, contendo a localização de cada um deles (na parte superior da feição), e posteriormente uma camada *shapefile* de polígono, contendo, além da localização, a área ocupada pelos escorregamentos. Esta última,

na forma de polígono, foi a utilizada para as tabulações do modelo. Desta forma, foram identificadas 61 cicatrizes ao longo da área de estudo.

Concomitantemente aos trabalhos de laboratório, foram realizados trabalhos de campo, percorrendo a área de Rebordo do Planalto identificando as cicatrizes para a conferência dessas, que foram previamente constatadas em imagens de satélite. Por vezes, ocorreram casos de cicatrizes visualizadas a campo, que não puderam ser constatadas em imagens de satélite, e o contrário também ocorreu, ou seja, cicatrizes visualizadas em imagens de satélite que não foram identificadas em campo, pois já se encontravam com a vegetação regenerada. Isso dificulta o trabalho, principalmente o primeiro caso, visto que a visualização de um movimento em campo, que não pode ser conferido em imagens de satélite, dificulta sua localização no *software* de SIG.

Em campo, com o uso de GPS, bússola, máquina fotográfica, *smartphone*, iPad e bloco de anotações, foram localizados, caracterizados e avaliados os escorregamentos planares, procurando identificar os principais fatores que influenciaram o processo. As primeiras cicatrizes de escorregamento foram mapeadas em conjunto com a aluna Angéli Aline Behling, para sua dissertação de mestrado intitulada “Fatores condicionantes dos movimentos de massa no município de Agudo – RS”. Na ocasião (ano de 2017) foram identificados 11 escorregamentos planares que foram avaliados de acordo com o Anexo C da Norma Brasileira de Estabilidades de Taludes (ABNT NBR 11682), adaptada para a pesquisa da aluna.

Os laudos de vistoria das cicatrizes trouxeram informações, como: a data da análise a campo; coordenadas do movimento; tipo de ocupação do entorno, vegetação, drenagem, relevo; características específicas relacionadas ao local como forma do plano e perfil de curvatura da vertente, a geometria (altura, largura, inclinação), existência ou não de obras de contenção, condição de saturação, natureza do material; tipo do movimento de massa; tipo de material e etc. Esta etapa de campo foi fundamental para compreensão dos processos e das variáveis envolvidas.

As demais cicatrizes utilizadas na presente tese foram identificadas ao longo do trajeto Santa Maria – Candelária, porém, nem todas puderam ser descritas conforme a norma, pois encontravam-se em locais de difícil acesso.

Cabe ainda destacar que a identificação visual das cicatrizes nas imagens de satélite foi realizada com base nas características das cicatrizes que foram mapeadas em conjunto com a aluna Angéli Behling. As características fundamentais para identificação foram: a forma da cicatriz, sempre retangular, a coloração típica de solo exposto, o comportamento da vegetação do entorno, e ainda características da própria vertente, como a porção específica em que os

escorregamentos eram encontrados em sua grande maioria (relativo à declividade e hipsometria).

Quando a escala dos mapas são pequenas, a representação das cicatrizes como polígonos não é visível e portanto, é comum utilizar pontos para identificar a área escorregada, ao invés de polígonos. Porém, no método do Valor Informativo, como se utilizam arquivos no formato *raster*, os escorregamentos devem ser representados por polígonos. Como pode ser visto na Figura 28, o polígono não engloba todo o fenômeno pois o que se quer analisar são os fatores que desencadeiam o escorregamento, por isso, faz-se a representação da cicatriz e não da área de deposição do material.

Figura 28 - Escorregamento no município de Santa Maria - RS com a delimitação da dinâmica de desencadeamento.

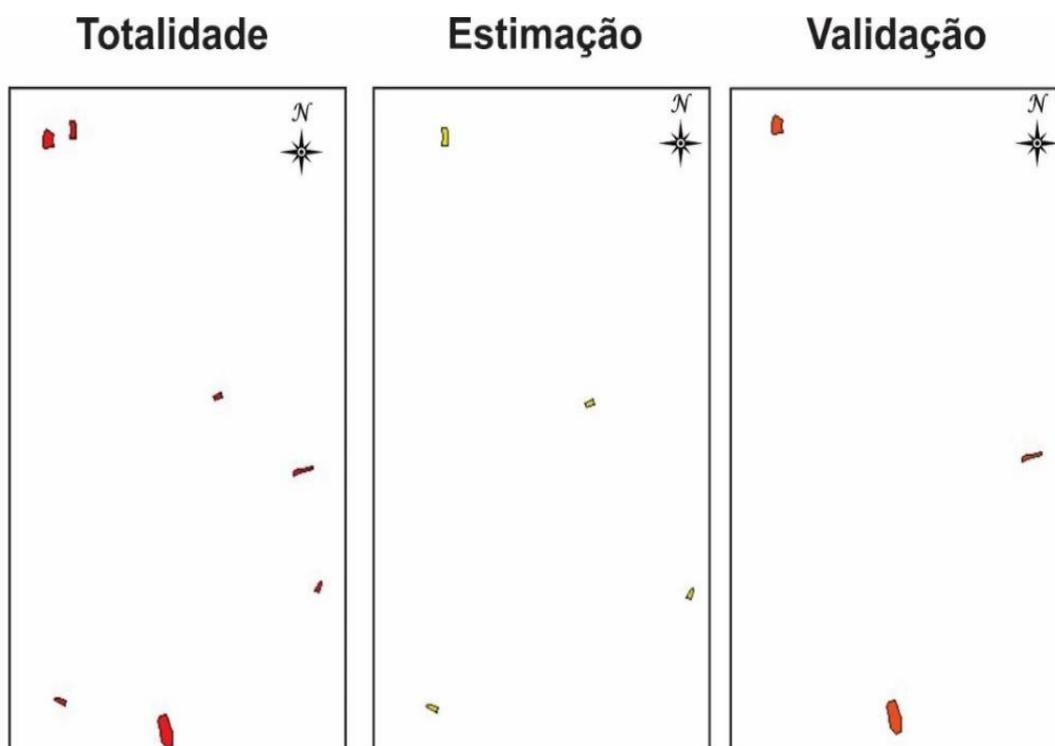


Fonte: Autor.

As feições foram delimitadas a partir do inventário inicial em formato vetorial do tipo ponto, com base nos trabalhos de campo, e posterior delimitação dos polígonos em ambiente SIG, com as imagens de satélite disponíveis nos *softwares* ArcGIS e QGIS. Foram identificadas 61 cicatrizes e delimitados 62 polígonos, sendo que esse polígono a mais se justifica pelo fato de duas cicatrizes possuírem um processo de desencadeamento bastante semelhante e próximo.

No entanto, este fato foi indiferente para o valor informativo, pois a partir do momento que as análises foram realizadas, foi considerado o número de píxeis em cada classe, independentemente do número total de escorregamentos. Para fins práticos, o *software* considerou o valor total de 62 cicatrizes, divididas em dois grupos de 31 movimentos cada, conforme a Figura 29.

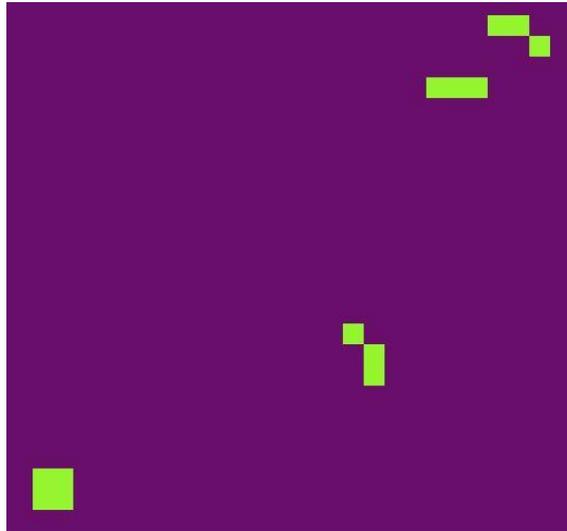
Figura 29 - Totalidade dos escorregamentos identificados e a divisão entre os grupos de estimação e validação.



Fonte: Autor.

A Figura 29 exemplifica um recorte com a totalidade dos movimentos dentro de uma determinada área com 7 cicatrizes de escorregamento (na cor vermelha), que foram posteriormente divididos de maneira aleatória no grupo de estimação (cor amarela), com 4 cicatrizes, e também no grupo de validação (cor laranja) com 3 cicatrizes. Após a transformação desses dados de vetor para raster, teve-se como resultado o exemplo da Figura 30.

Figura 30 - Escorregamentos representados por píxeis.



Fonte: Autor.

É pertinente destacar que ao final o SIG identificou um número par de cicatrizes (62), mas mesmo que fossem considerados 61 movimentos, a ferramenta de partição aleatória funcionaria sem problemas. Neste caso um dos grupos possuiria um número ímpar (31) e outro par (30), independentemente de ser o grupo de estimação ou validação. Ao final, o que se tem é um grupo que foi utilizado para realizar o modelo de suscetibilidade (grupo de estimação) e o segundo na validação (grupo de validação).

Após um primeiro processamento dos dados e estabelecimento dos Valores Informativos das classes, verificou-se que pelo fato das cicatrizes se apresentarem mais concentradas na porção sul do Rebordo do Planalto, havia uma grande parte da área sem ocorrência de escorregamentos (porção nordeste). Desta forma, optou-se por reduzir o recorte da área de estudo considerando somente a presença de cicatrizes de escorregamento, que foram os balizadores do novo limite da área.

Levando em consideração que o método do Valor Informativo trabalha com dados no formato raster, os dois grupos (estimação e validação) foram transformados do formato vetorial para matricial (raster), com o tamanho do *pixel* de 12,5 metros (156,25 m<sup>2</sup>), sendo assim compatíveis com os mapas temáticos apresentados na pesquisa.

### 4.3.2 Variáveis analisadas

As variáveis selecionadas para comporem o modelo de suscetibilidade a escorregamentos planares nesta tese foram: hipsometria, declividade, orientação de vertente, perfil de curvatura, plano de curvatura, direção de fluxo, TWI (*Topographic Wetness Index*), solo, litologia e geomorfologia.

A hipsometria é a análise da variação altimétrica do relevo a partir das informações planimétricas e altimétrica (SILVEIRA, 2010). Ocorre que apesar de utilizada em algumas pesquisas, não há uma forte relação entre a altimetria e os movimentos de massa, visto que estes ocorrem em altitudes bastante distintas na natureza.

A declividade é entendida como a inclinação das vertentes (MOORE, et al., 1993), que na presente pesquisa utilizou-se da subdivisão de acordo com as diferentes percentagens e graus. É considerada em muitos estudos como o parâmetro mais importante para determinar a ocorrência dos movimentos de massa do tipo escorregamento planar, visto que atua diretamente na suscetibilidade a movimentações. De maneira geral, tem-se que declividades mais elevadas corroboram para movimentos de massa do tipo escorregamento, a depender, é claro, da relação com outros parâmetros.

A orientação de vertente é também conhecida como a exposição, direção ou aspecto, sendo relativa à variação da declividade. Assim, compõe, juntamente com a declividade, a geometria de exposição da superfície do terreno no relevo. A orientação de vertentes é definida como o ângulo azimutal correspondente a maior inclinação do terreno sendo expressa em graus, de 0 a 360° (MCBRATNEY, MENDONÇA-SANTOS e MINASNY, 2003). A exposição do material frente aos fatores climáticos pode refletir, por exemplo, no conteúdo de umidade recebido. Neste sentido, a maior ou menor umidade influenciará a formação e tipologia da cobertura vegetal, a espessura e porosidade do solo, e, sobretudo, a umidade presente pode influenciar a saturação dos solos.

Em vertentes onde o material de alteração sofre maior ciclo de umedecimento e secagem, há maior probabilidade de estarem suscetíveis à ruptura, devido ao aumento das fissuras e da porosidade, que são responsáveis também pelo acréscimo de água e elevação das pressões dentro do material (GUIMARÃES et al., 1998; GAO, 1993). Desta forma, o arquivo *shapefile* possui uma classificação representada por nove variações, sendo elas: norte, sul, leste, oeste, nordeste, noroeste, sudeste, sudoeste e plano.

A curvatura em perfil ou em plano são compreendidas como a taxa de variação da declividade na direção da orientação da vertente, e a taxa de variação da declividade na direção

ortogonal à da orientação, respectivamente (MCBRATNEY, MENDONÇA-SANTOS e MINASNY, 2003; MOORE, et al., 1993; SILVEIRA, 2010). As formas côncavas (perfil) são áreas preferenciais para a concentração de água, logo presenciam uma elevação mais rápida das cargas de pressão durante um evento pluviométrico, necessitando de um menor volume de chuva para ocorrer ruptura (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998). Já nas formas convexas (perfil), o fluxo é preferencialmente divergente (plano), e a água no solo aparece localmente devido a fortes chuvas ou à heterogeneidade da rocha, que força o fluxo subsuperficial em direção ascendente no solo. Mesmo sendo áreas divergentes (plano) e declivosas, essas necessitam de uma grande descarga de chuva para aumentar sua instabilidade (RENEAU e DIETRICH, 1987).

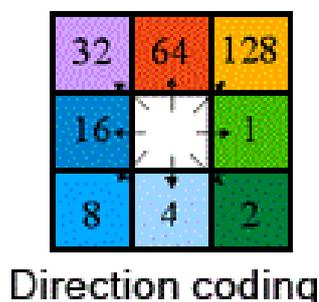
É importante salientar que a inexistência de curvatura, ou seja, quando a vertente não pode ser classificada como convexa, nem como côncava, seria correspondente a valores nulos, em decorrência da característica plana da vertente, ao passo que os valores positivos representariam uma curvatura côncava, e os valores negativos correspondem à curvatura convexa. Ocorre que, na natureza, é improvável a existência de vertentes com valores nulos. Neste sentido, dificilmente o que se julga como retilíneo realmente apresentará o valor de curvatura realmente nulo, sendo, na realidade, apenas um valor próximo a este (VALERIANO, 2003; TRENTIN e ROBAINA, 2016).

Assim como, quando se analisa o perfil, na apreciação do plano de curvatura, especialmente na análise em SIG, percebem-se valores nulos, que correspondem à inexistência de curvatura, ou seja, vertentes planas. De maneira também semelhante, valores positivos representam a curvatura divergente, e valores negativos à curvatura convergente (TRENTIN e ROBAINA, 2016).

A direção de fluxo é outra variável bastante pertinente na análise de movimentos de vertente, como os escorregamentos, visto que leva em consideração a direção pela qual a água irá percorrer. Dentro deste contexto, é pertinente perceber uma série de alternativas de técnicas existentes quando se pretender gerar um mapa de direção de fluxo, como exemplos fundamentais, destacam-se: D8,  $D^\infty$  (*D-Infinity*) e MFD (*Multiple Flow Direction*).

A direção de fluxo que se utiliza do método D8 é possivelmente a mais simples delas. Possui esse nome, pois o ângulo de deslocamento do fluxo é assim apresentado, em intervalos de  $45^\circ$  ( $360/8$ ), fazendo com que o método restrinja a variedade de situações reais a apenas 8 direções possíveis. Assim, o processamento classifica o direcionamento da água nas seguintes direções, em ordem: leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste, noroeste, norte e nordeste. Essa classificação está representada na Figura 31.

Figura 31 - Processamento da direção de fluxo a partir do método D8.



Fonte: <https://pt.slideshare.net/railano/aula-06-34513995>.

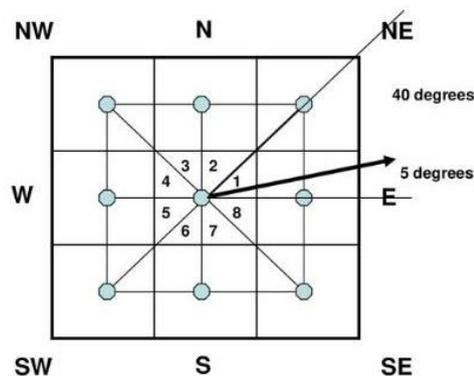
O método D8 é bastante criticado visto que sua classificação é restrita, porém também possui algumas vantagens, pois além da simplicidade e bom desempenho, uma relação biunívoca dos canais é estabelecida entre os caminhos de fluxo calculadas usando D8 e as próprias direções, um fato que é perdido em abordagens de tipo não-discretas que são propostas como soluções para a otimização e melhoria do método (FERRERO, 2004).

Neste sentido, esse algoritmo dá origem a fluxos de água que apresentam rotas certamente diferentes (com diferenças de orientação de até 44°, por exemplo), assim podem ser incluídas dentro da mesma categoria de fluxo, uma vez que os endereços reais são forçados para um dos intervalos, uma vez que os caminhos são forçosamente classificados em intervalos de amplitude  $\pi/4$  (FERRERO, 2004).

A classificação da direção de fluxo a partir do algoritmo  $D_\infty$  (*D-Infinity*) ou ainda “D-Infinito”, como é conhecido em português, é uma das melhores propostas para aprimorar o modelo D8 e alcançar a caracterização dos fluxos em uma faixa de valores mais extensa do que a de 8 células. Foi formulada por David Tarboton, e, neste processo, é considerada uma medida contínua dos ângulos em que o fluxo entre as células contíguas ocorre (FERRERO, 2004).

A direção do fluxo é codificada como um ângulo em radianos, no sentido anti-horário a partir do leste como uma quantidade contínua (ponto flutuante) entre 0 e  $2\pi$ . O fluxo resultante em uma grade é então geralmente interpretado como sendo proporcional entre as duas células vizinhas que definem a faceta triangular com a inclinação mais baixa para baixo (FERRERO, 2004). Esta análise pode ser melhor observada na Figura 32.

Figura 32 - Esquema explicativo dos valores de direção de fluxo do método D-Infinity



Fonte: <https://slideplayer.com/slide/15963102/>.

De forma semelhante, o método MFD (*Multiple Flow Direction*), como o próprio nome indica, distribui o fluxo de uma célula para várias células vizinhas em menor elevação (QUINN et al., 1991). Este divide a quantidade de fluxo de uma célula para células descendentes adjacentes, e gera padrões de acumulação de fluxo mais suaves e mais realistas em áreas de declive baixo (PARK; AGYARE; AKRAMKHANOV, 2009). Uma desvantagem apontada nesta técnica é que a variação de fluxo é alta, e este destaque em determinados pontos, aliado à suavidade em outras, podem ser indesejadas dependendo do processamento.

Cabe destacar que as direções de fluxos estão ajustadas a diferentes objetivos, e por esse motivo não são melhores ou piores que as demais. Elas foram definidas no contexto de processos de investigação e podem ser melhor representativas para cada processo para que foram definidas. Diante disso, na presente pesquisa, optou-se por não se utilizar da direção de fluxo D8, devido as suas limitações neste contexto, e também por ter sido realizado um teste de sensibilidade com resultado pouco expressivo. Efetivamente, a direção de fluxo utilizada foi a *D-Infinity* ( $D^\infty$ ), visto que não apresentava as limitações do D8, e ainda não tem como característica a questão de intensificar demasiadamente cursos d'água mais expressivos. De qualquer forma, a direção de fluxo MFD (*Multiple Flow Direction*), está presente indiretamente na pesquisa, visto que é utilizada no cálculo da fórmula do TWI, juntamente com os dados de declividade.

O Índice de Umidade Topográfica (TWI), *Topographic Wetness Index*, é utilizado para identificar áreas úmidas e descrever o efeito da topografia na localização e no tamanho das áreas de origem de saturação e de geração de escoamento (MOORE et al., 1993;

POURGHASEMI et al., 2012). O TWI apresenta valores elevados para áreas mais saturadas e menores para área bem drenadas, com menor contribuição de fluxo de montante (SILVEIRA, 2010). O cálculo do TWI se apresenta de acordo com o pressuposto de condições de curso estável e propriedades uniformes do solo, ou seja, a transmissividade é constante ao longo da captação (MOORE et al., 1991; POURGHASEMI et al., 2012).

Desta forma, o TWI é definido pelo logaritmo natural da razão entre área de contribuição ( $A_s$ ) e a tangente da declividade ( $\beta$ ), de acordo com a equação:

$$TWI = \ln(A_s / \tan \beta) \quad (4)$$

Em que:

$A_s$  = a área de captação específica ( $m^2 m^{-1}$ ) e

$\beta$  = o gradiente de inclinação (em graus).

De acordo com a equação, percebe-se que o TWI é função apenas da declividade e varia com as funções tangentes e logaritmo natural, estando sujeito a seguinte restrição:  $0^\circ > \beta > 90^\circ$ . Desta maneira, quando a declividade se aproxima de  $0^\circ$ , o limite dessa função tende para infinito, e quando declividade aproxima de  $90^\circ$ , o limite tende a zero. O significado físico desse comportamento é que quanto mais plano for o relevo, mais úmido (alto valor de umidade) o solo se apresenta e o contrário também é verdadeiro (SILVEIRA, 2010).

Outras três variáveis analisadas na presente pesquisa foram litologia (CPRM, 2003), solos (IBGE, 2003) e geomorfologia (IBGE, 2003). Como estas variáveis estavam disponíveis somente em formato vetorial, tiveram que passar por um processo de ajustamento, eliminando pequenos erros nos vetores, para depois ainda passar pelo processo de transformação de camada vetorial para matricial.

A importância dessas temáticas já foi discutida em outras etapas da presente pesquisa, mas, de forma resumida, pode-se dizer que a litologia buscou classificar a área a partir de suas Formações geológicas, levando em consideração também o tipo de material mobilizado, fruto do produto dessa litologia, ou seja, esse dado em si pode influenciar indiretamente o processo de movimento de massa estudado. A relevância ou não desta variável foi indicada pela técnica aplicada ao final da pesquisa.

Os solos foram classificados de acordo com o que é indicado pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), a partir dos dados disponibilizados pelo IBGE. A intenção no uso deste dado é perceber se há uma influência relevante na distribuição dos tipos

de solos com relação aos escorregamentos ocorridos na área. De antemão sabe-se que os solos mais rasos, como os Neossolos, comumente possuem relação com declividades mais acentuadas, estas fortemente relacionadas com os pontos de “gatilho” dos processos.

Com relação à geomorfologia, buscou-se perceber se havia alguma relação com as classes geomorfológicas apresentadas nos dados do IBGE e a presença de escorregamentos. Esta possibilidade ocorre devido as formas do relevo serem bastante pertinentes à pesquisa, sendo inclusive balizadores para a delimitação da área de estudo, já que se levou em consideração o Rebordo do Planalto, uma área com características geomorfológicas específicas. As particularidades destas três variáveis podem revelar algum destaque com relação à importância na aplicação no modelo final de suscetibilidade a escorregamentos. Essas respostas só são possíveis em processamentos finais, e apesar de não serem escalas ideais para tais análises, buscou-se testar todos os materiais que apresentavam alguma possibilidade de interação positiva com o trabalho.

Tendo as temáticas já sido classificadas de uma maneira representativa para o trabalho, houve uma reclassificação apenas visando facilitar os processamentos em SIG. A partir de então foi possível realizar o cruzamento das cicatrizes do grupo de estimação com os mapas temáticos (11 mapas no total), e descobrir o número de pixels deslizados e não deslizados em cada classe de cada mapa temático (Figura 33).

Figura 33 - Exemplo de tabulação das áreas com a apresentação do resultado das áreas não escorregadas (VALUE 0) e escorregadas (VALUE 1).

VALUE 0	VALUE 1
562451406,25	312,5
312665625	0
256378593,75	312,5
182402812,5	2187,5
140086406,25	1718,75
90213750	3437,5
91818437,5	12656,25

Fonte: Autor.

Com essas informações, foi possível calcular o valor informativo para cada classe de cada um dos mapas temáticos, a partir das fórmulas já apresentadas na presente pesquisa, como exemplo a Figura 34, em que há a exemplificação do cálculo realizado para a temática de declividade. O mesmo procedimento ocorreu para as demais variáveis.

Figura 34 - Cálculo do Valor Informativo para a temática de declividade

VALOR INFORMATIVO												
classe	count	Área m <sup>2</sup>	Área deslizada m <sup>2</sup>	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	log	vi x 1000
0 - 10°	3658002	571562812,5	312,5	312,5	571562812,5	20625	1657997188	5,47E-07	1,24E-05	0,043952	-3,125	-3124,66
10 - 15°	2027978	316871562,5	0	0	316871562,5	20625	1657997188	0	1,24E-05	0	-6,000	-6000,00
15 - 20°	1662567	259776093,8	312,5	312,5	259776093,8	20625	1657997188	1,2E-06	1,24E-05	0,096703	-2,336	-2336,11
20 - 25°	1181869	184667031,3	2187,5	2187,5	184667031,3	20625	1657997188	1,18E-05	1,24E-05	0,952245	-0,049	-48,93
25 - 30°	906660	141665625	1718,75	1718,8	141665625	20625	1657997188	1,21E-05	1,24E-05	0,9753	-0,025	-25,01
30 - 35°	582660	91040625	3437,5	3437,5	91040625	20625	1657997188	3,78E-05	1,24E-05	3,03527	1,110	1110,30
> 35°	591446	92413437,5	12656,25	12656	92413437,5	20625	1657997188	0,000137	1,24E-05	11,0093	2,399	2398,74
	10611182	1657997188	20625	20625	1657997188							

Fonte: Autor.

### 4.3.3 Taxas de sucesso e predição

O teste de sensibilidade foi realizado com o grupo de estimação, ou seja, o grupo que é utilizado na elaboração do modelo de suscetibilidade. Este teste foi possível a partir dos valores do processamento anterior, em que se tem os valores totais de área das classes e também a área total escorregada em cada classe. Pôde-se então realizar o somatório com a área acumulada total e a área acumulada dos escorregamentos (AAC). O resultado desse processamento é o somatório de todos os logaritmos de cada classe cujo valor será no máximo 1 (em que 1 seria 100%).

Para Oliveira Filho (2012), os métodos de validação cruzada são uma das diversas técnicas utilizadas para testar a qualidade dos modelos preditivos. Desta forma, um mapa de suscetibilidade é melhor quando a sua capacidade de prever a localização de movimentos futuros for maior. Para isso, o procedimento padrão de validação dos mapas de suscetibilidade inclui comparar os mapas:

- a) Com os mesmos movimentos usados para construir o modelo preditivo, definindo o grau de ajuste do modelo, fundamental para a transferência dos resultados para os utilizadores finais (e.g. curvas/taxas de sucesso);
- b) Com inventários de movimentos independentes dos que foram utilizados para a modelação, permitindo aferir a capacidade preditiva do modelo (e.g. curvas/taxas de predição).

Sendo assim, a determinação das taxas de sucesso e de predição foi um procedimento de validação cruzada utilizado para testar a validade de um modelo, em que a taxa de sucesso é calculada através da comparação do mapa de suscetibilidade e o grupo de estimação dos

deslizamentos, e a taxa de predição é calculada através da comparação entre o mesmo mapa e o grupo de validação dos deslizamentos (PEREIRA, 2009).

Assim, é esperado que as taxas de sucesso sejam melhores do que as taxas de predição para uma determinada área de estudo, e para se quantificar a qualidade global do modelo de predição utiliza-se o cálculo das “áreas abaixo da curva” (AAC) (PEREIRA, 2009). As AAC calculam-se a partir da seguinte fórmula:

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[ (Lsi - Li) * \frac{ai+bi}{2} \right]$$

*Sendo:*

*(Lsi-Li)= amplitude da classe;*

*Ai= valor da ordenada correspondente a Li;*

*Bi= valor da ordenada correspondente a Lsi (5)*

As AAC (Área Abaixo da Curva) variam entre 0 e 1, o que corresponde à capacidade preditiva mínima e máxima, respectivamente. O valor de 0,5 de AAC corresponde ao mínimo de elegibilidade do modelo de predição (PEREIRA, 2009).

Como exemplo, tem-se o teste realizado para a variável orientação de vertente, com o resultado do somatório dos logs sendo igual a 0,67, obtendo no teste de sensibilidade a taxa de sucesso da temática de 67%, conforme a Figura 35.

Figura 35 - Exemplo de taxa de sucesso de uma temática orientação de vertente.

VALUE	COUNT	area (m²)	VI	Área desliza (m²)	Área cum	Escor. cum	C	B-A/2	A	
					0	0				
5	1362671	1362671	781	37	0,128418399	0,28030303	0,128418	0,140152	0,017998	
4	1267783	1267783	461	25	0,247894532	0,46969697	0,119476	0,375	0,044804	
3	1250005	1250005	252	20	0,365695264	0,621212121	0,117801	0,545455	0,064255	
2	1223560	1223560	-84	14	0,481003813	0,727272727	0,115309	0,674242	0,077746	
6	1435225	1435225	-174	15	0,616259715	0,840909091	0,135256	0,784091	0,106053	
7	1372286	1372286	-352	12	0,745584234	0,931818182	0,129325	0,886364	0,114629	
9	1291528	1291528	-831	7	0,867298101	0,984848485	0,121714	0,958333	0,116642	
8	1285125	1285125	-2079	2	0,988408549	1	0,12111	0,992424	0,120193	
1	122999	122999	-4000	0	1	1	0,011591	1	0,011591	
		10611182		132					<b>0,67</b>	taxa sucesso

Fonte: Autor.

Por fim, foi realizado o cálculo com o grupo de validação sendo comum que os valores das taxas deste grupo sejam mais baixos, visto que os escorregamentos que foram utilizados para a elaboração do modelo não são os mesmos da análise final.

#### 4.3.4 Elaboração dos modelos de suscetibilidade a escorregamentos

Diante de todas as taxas de sucesso e predição, foram escolhidas as variáveis com melhores respostas, ou seja, com melhores taxas tanto de sucesso quanto predição, para a elaboração do modelo final.

É esperado que o somatório das temáticas traga um resultado melhor do que qualquer temática individualmente. Isso pôde ser conferido ao ser realizado novamente o cálculo das taxas de sucesso, agora com as variáveis previamente somadas. Por fim, o teste que apresentou a melhor resposta foi submetido a uma análise das quebras da taxa de sucesso (curva AAC), para estipular em que ponto as classes devem ser separadas.

Na literatura, é comum que os mapas de suscetibilidade a escorregamentos, utilizando o método do Valor Informativo, sejam divididos em 5 classes, sendo elas: Muito pouco suscetível, Pouco suscetível, Medianamente suscetível, Suscetível e Muito suscetível, o que foi adotado nesta pesquisa.

Ao final, com o mapa concluído, dividido nas 5 classes, pôde-se novamente realizar o cruzamento com ambos os grupos (estimação e validação). Como neste momento se tem o mapa reclassificado, foi possível saber o número de *pixel* escorregado em cada uma das classes, das menos as mais suscetíveis. A partir de então, pôde-se realizar o cálculo da probabilidade espacial, que basicamente levou em consideração o percentual total de cada classe e o percentual de todos os escorregamentos que ocorreram naquela classe especificamente. Por fim, o percentual total de área escorregada na classe foi dividido pelo total da área da classe (de suscetibilidade), sendo este resultado o valor da probabilidade espacial. Quanto maior a probabilidade espacial nas classes de maior suscetibilidade estipulada pelo pesquisador (classe suscetível e, principalmente, muito suscetível), melhor o resultado do modelo final de suscetibilidade a escorregamentos. Por fim, o melhor modelo originou o mapa final de suscetibilidade a escorregamentos planares no Rebordo do Planalto, utilizando o método do Valor Informativo, e dividido em 5 classes de suscetibilidade.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados resultados que foram obtidos ao longo de cerca de quatro anos de pesquisa, com diversas modificações tanto na área de estudo, quanto nas técnicas escolhidas e até mesmo nos dados encontrados, visto que a ciência evolui ao longo do tempo. Apresentam-se aqui então, desde os mapas básicos para compreensão e análise da área de estudo, até os processamentos mais avançados visando a elaboração do mapa de suscetibilidade a escorregamentos planares.

### 5.1 INVENTÁRIO

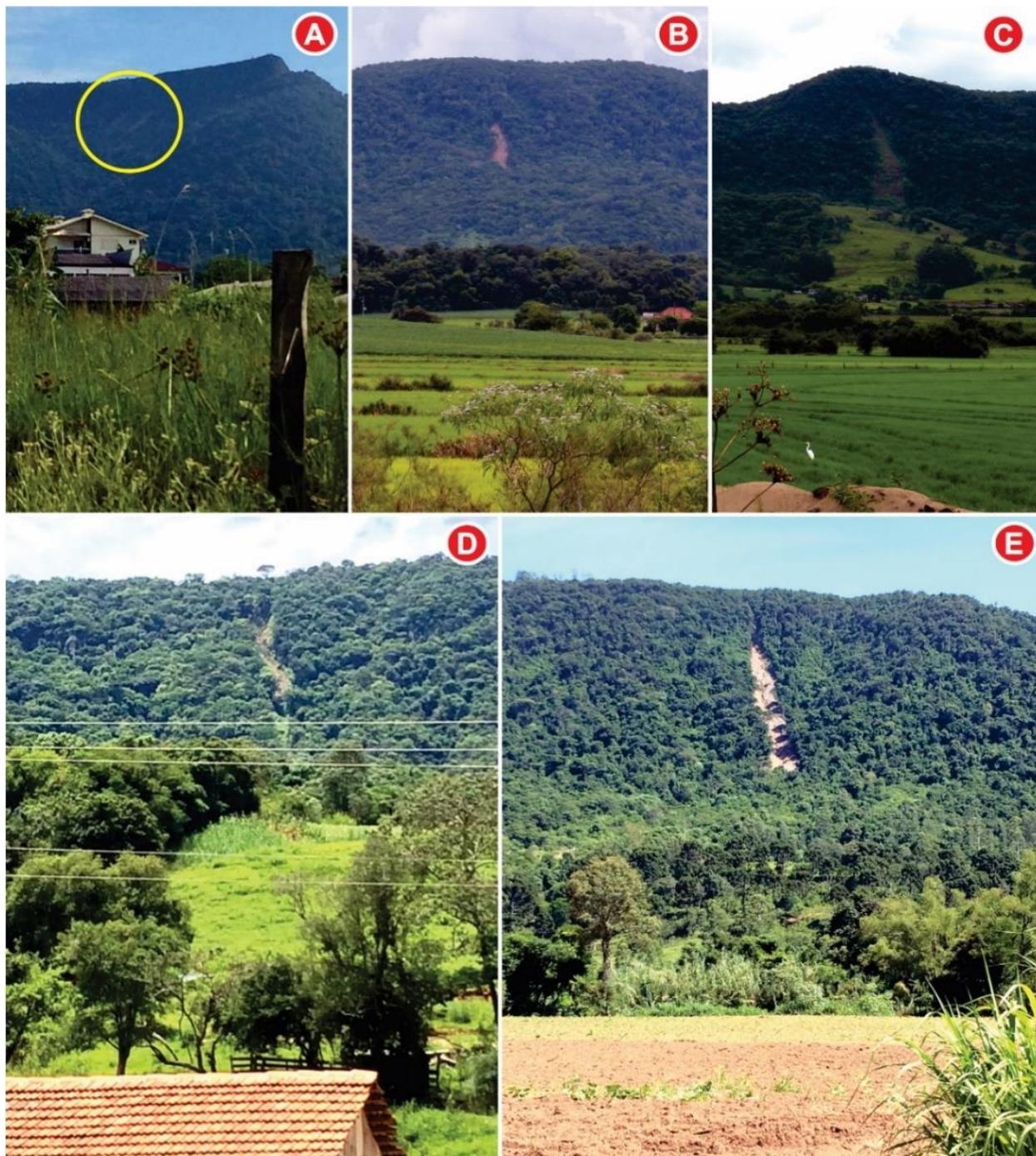
O inventário dos movimentos de massa do tipo escorregamentos planares teve início com os trabalhos da acadêmica Angéli Aline Behling, para sua dissertação de mestrado intitulada “Fatores condicionantes dos movimentos de massa no município de Agudo – RS” defendida no ano de 2017 (BEHLING, 2017). A referida dissertação tratou da identificação dos tipos de movimentos de massa que ocorriam em Agudo e de suas condicionantes. Todos os movimentos de massa do tipo escorregamentos planares, identificados na dissertação da aluna, fazem parte do inventário desta tese.

Em 24 de janeiro de 2017 foi realizado outro campo, desta vez com a intenção de procurar cicatrizes de escorregamentos devido ao expressivo volume de chuvas que havia ocorrido nos dias anteriores em praticamente toda a Quarta Colônia. Na ocasião, os municípios visitados foram os de Agudo, Dona Francisca, Faxinal do Soturno, São João do Polêsine e Silveira Martins.

Nesta saída a campo foram visitados oito pontos da Quarta Colônia em que foram identificadas cicatrizes de escorregamentos planares. Estes foram descritos e avaliados considerando: forma da cicatriz, material mobilizado, tipo de rocha sobre a qual o material escorregou, tipo de plano e perfil de curvatura das vertentes, entre outras informações (Figura 36).

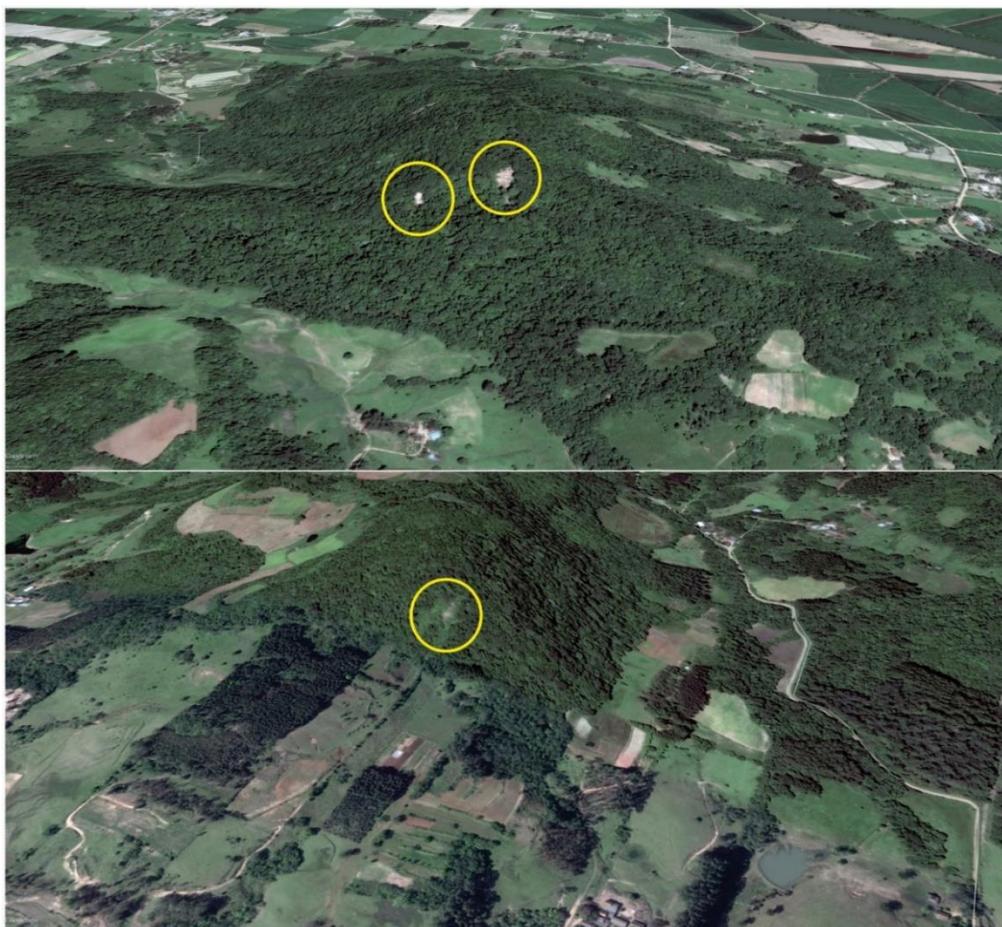
Destaca-se que alguns movimentos de massa não puderam ser observados de perto por estarem localizados em áreas de difícil acesso ou até mesmo por se encontrarem dentro de áreas privadas que necessitariam de autorização. Diante disto, com a tomada de fotografias e com a utilização de bússola em campo, pode-se localizar as vertentes no *software* Google Earth Pro, que quando coincidia a data das imagens do programa com os momentos em que as cicatrizes estavam expostas no campo, permitiram a visualização das cicatrizes, conforme a Figura 37.

Figura 36 - Evidências de escorregamentos planares em diferentes municípios da Quarta Colônia, RS.



Fonte: Autor.

Figura 37 - Visualização de cicatrizes de escorregamentos planares no Google Earth.



Fonte: Google Earth Pro e organizado pelo Autor.

Outros campos foram realizados na intenção de encontrar novas cicatrizes de escorregamentos, observar a evolução de cicatrizes já conhecidas, além de uma aproximação maior com a área, trazendo mais segurança às análises. Assim, foi realizado um campo no dia 29 de janeiro de 2018, com estagiários do curso de Geologia da UNIPAMPA de Caçapava do Sul, para identificação de alguns escorregamentos em Agudo. No dia 26 de maio do mesmo ano, fez-se um campo auxiliar, em que se confirmaram mais três escorregamentos (Figura 38).

Com base nos escorregamentos que foram observados em Agudo, acompanhando as pesquisas da acadêmica Angéli Aline Behling, pode-se dizer que os processos de escorregamentos planares deixam cicatrizes retilíneas com solos ou rochas sedimentares expostas onde o material mobilizado é colúvio/tálus. Estão localizados em áreas de declividades acentuadas, comumente entre 30 e 35° e maiores do que 35°, tendo o seu início no topo das encostas onde ocorre uma “quebra” da declividade possivelmente devido a mudança de litologia

de ígnea para sedimentar associado, possivelmente, a maior disponibilidade de água nessas áreas. São processos rasos associados à presença de colúvios/tálus sobre rochas alteradas de origem sedimentar (arenitos) preferencialmente, o que configura comumente as superfícies de cisalhamento.

Figura 38 - Escorregamentos planares em Silveira Martins, no campo auxiliar do dia 26 de maio de 2018.



Fonte: Autor.

A vegetação da área de entorno destes processos é predominantemente arbórea de porte médio a alta. A drenagem é natural em condições satisfatórias pois vê-se a água fluindo nas vertentes. O relevo é escarpado e os processos ocorrem em vertentes com perfil e planos de curvatura côncavo-divergentes e divergentes e também em convexos-convergentes.

Estando então definido o tipo de processo e o recorte da área de estudo, foi realizado um novo trabalho de campo nos dias 15 e 16 de dezembro de 2018. O objetivo deste campo foi confirmar escorregamentos já visualizados em imagens de satélite, tanto em SIG (QGIS e ArcGIS) quanto no Google Earth Pro. As observações foram realizadas ao longo de todo o trajeto da área de estudo, porém concentrou-se mais nas proximidades do município de Cerro Branco, visto que nesta região foi identificado um grande número de escorregamentos nas imagens de satélite.

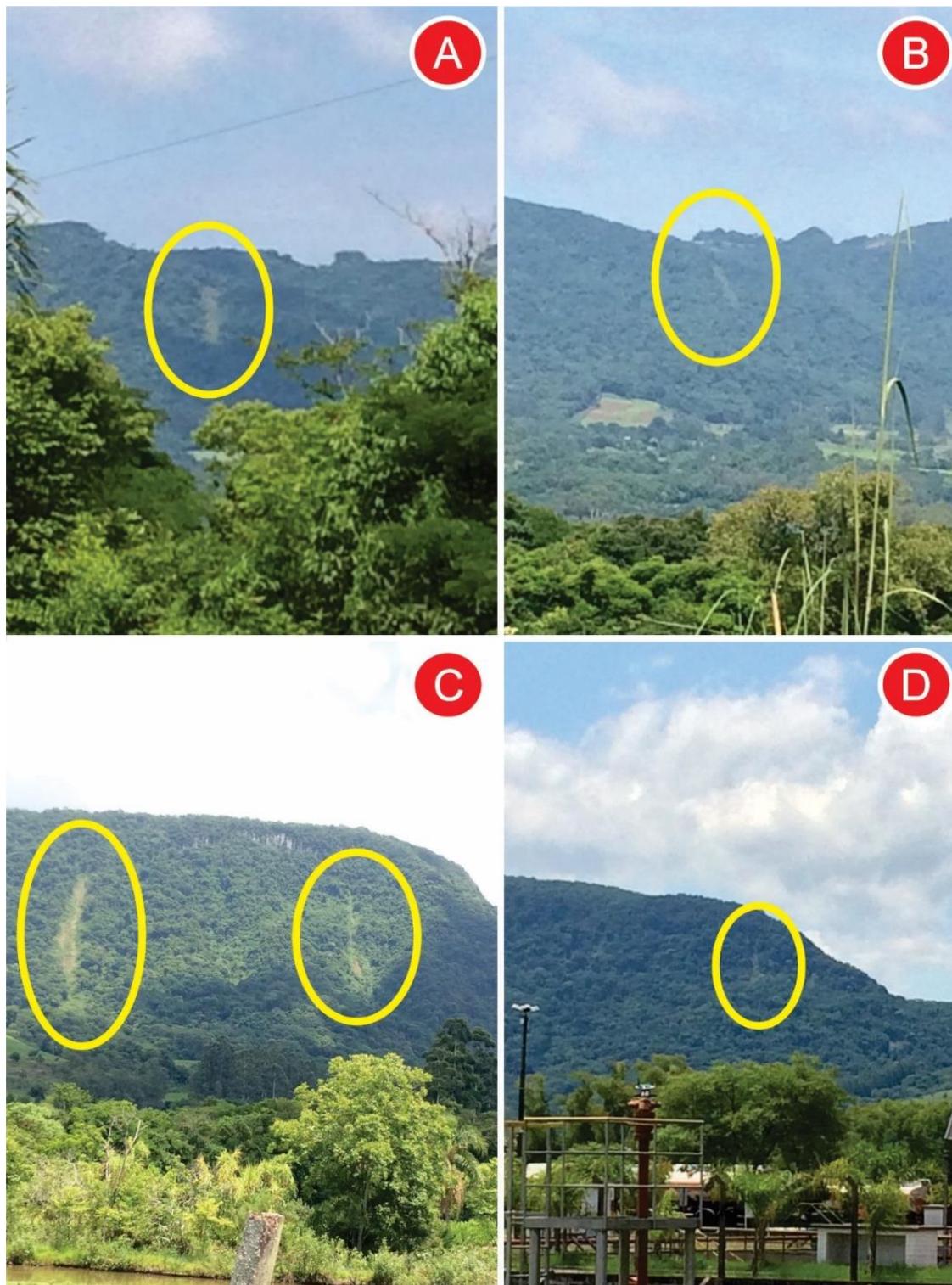
Neste campo, muitos movimentos foram confirmados, novos foram encontrados e alguns acabaram não tendo confirmação, ou por realmente não se tratarem de movimentos, ou pelo fato do acesso ser impossível e/ou sem visualização devido a relevo e vegetação. Além disso, foram identificados dois novos escorregamentos nas proximidades da Base Área de Santa Maria (BASM). Alguns registros dos escorregamentos desse campo podem ser conferidos na Figura 39.

A última saída de campo ocorreu no dia 24 de janeiro de 2019, e contou com a participação de dois professores geólogos e mais três acadêmicos do curso de geologia da UNIPAMPA de Caçapava do Sul. O objetivo foi analisar, de forma mais detalhada, a geologia, solo e demais características que pudessem auxiliar na elaboração do modelo de suscetibilidade e para tanto, foi escolhido percorrer a rodovia RS-149 que liga o município de Faxinal do Soturno a Nova Palma, RS.

A encosta ao longo desta rodovia é formada por arenitos finos com lentes silto-argilosas da Formação Caturrita na base e sobre elas ocorrem os arenitos da Formação Botucatu. Encontram-se, também, basaltos da Formação Serra Geral (Figura 40), em alguns locais em discordância de não conformidade sobre a Formação Caturrita. Os arenitos da Formação Botucatu podem ocorrer na forma de *intertrapp* em alguns locais. No topo da encosta, ocorrem novamente os basaltos.

Recobrando toda a encosta, ocorrem os depósitos superficiais de colúvios/tálus que se constituem de materiais de matriz areno- argilosa com blocos de rocha de basaltos e arenitos de diversos tamanhos (Figura 41). Vale destacar ainda que o colúvio se assemelha muito com as rochas alteradas e por vezes pode ser confundido com elas.

Figura 39 - Escorregamentos planares confirmados no campo dos dias 15 e 16 de dezembro.



Em que: a), b) e c) cicatrizes de escorregamento planar em diferentes estágios de evolução e área no município de Cerro Branco d) cicatriz de escorregamento no município de Santa Maria  
Fonte: Autor.

Figura 40 - Basaltos da Formação Serra Geral constatados em visita a campo.



Fonte: Autor.

Figura 41 - Basaltos alterados na base do perfil, recobertos por colúvio raso.



Fonte: Autor.

Assim, a partir de novas saídas a campo, com o estabelecimento de pontos com receptor de GPS, o inventário foi ganhando volume à medida que novos escorregamentos eram constatados ou ao menos levantadas as possibilidades de ocorrência, com a posterior

conferência em imagens de satélite das diferentes fontes. A partir do momento da identificação visual, baseado em características padrão, como a coloração do solo exposto, a espessura média das cicatrizes, as características da moldura do polígono, além das semelhanças dos locais em que era encontrada, novas cicatrizes foram sendo adicionadas ao inventário.

## 5.2 CRUZAMENTO DAS CLASSES TEMÁTICAS COM O INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

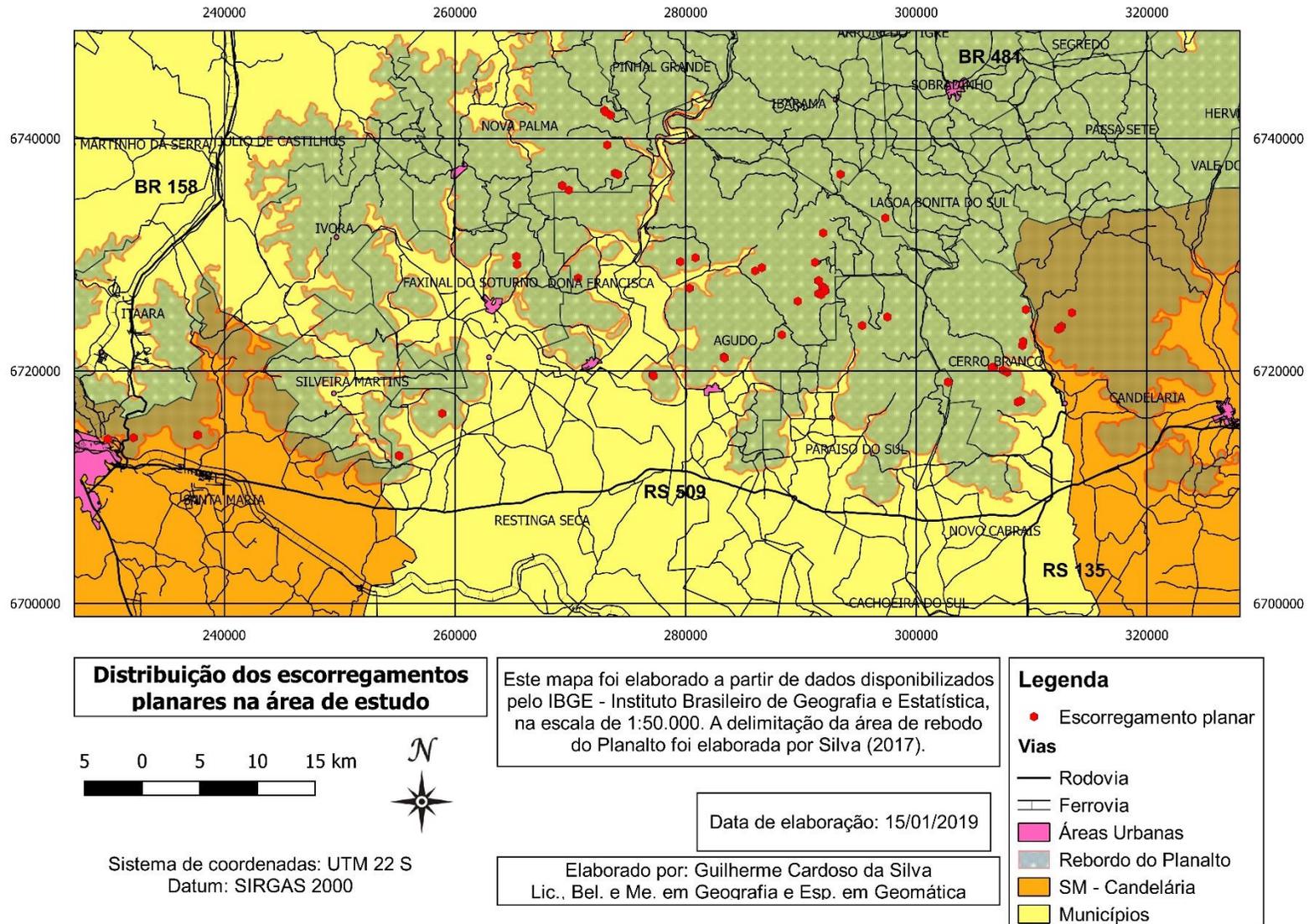
Conforme pode ser visto no mapa da Figura 42, os escorregamentos encontram-se bem distribuídos ao longo da área de estudo, onde há um volume maior de escorregamentos no sentido centro-leste da área de estudo, assim como nas faces das vertentes voltadas para sul, o que já era, de certa forma, esperado, até mesmo pela delimitação do Rebordo, que é mais significativa para a pesquisa na face sul em comparação com a norte, visto que neste último local já se tem o Planalto, e não mais da definição do Rebordo. Os escorregamentos estão distribuídos nos municípios de:

Agudo (21), Nova Palma (10), Cerro Branco (9), Candelária (5), Santa Maria (4), Paraíso do Sul (4), São João do Polêsine (3), Faxinal do Soturno (2), Dona Francisca (1), Lagoa Bonita do Sul (1) e Ibarama (1).

O topo do Rebordo do Planalto corresponde aos basaltos/latitos da Formação Serra Geral (Fácies Gramado). Abaixo, ocorrem os arenitos da Formação Botucatu. A Formação Botucatu está presente em uma estreita porção mais especificamente na alteração da Depressão Central para o Rebordo do Planalto, mais designadamente na área interna, ou seja, uma área de transição geomorfológica. Essa região tem como característica o princípio da elevação do terreno (maiores altitudes) e consideráveis declividades, apesar de raramente as mais expressivas. Na área interna do Rebordo do Planalto a Fácies Caxias da Formação Serra Geral (riolitos e riodacitos) predominou na porção leste, se aproximando do município de Candelária. Essa porção corresponde a áreas de altimetrias mais elevadas e declividades variadas.

Avaliando a relação dos escorregamentos com a litologia, percebe-se que 48 dos movimentos ocorreram nos basaltos e latitos da Formação Serra Geral (Fácies Gramado); 5 em Arenito fino e Quartzo arenito (Formação Botucatu), 4 em nos riodacitos e quartzo latitos da mesma Formação Serra Geral (Fácies Caxias), e 4 em Arenito Pelito (Formação Caturrita), conforme a Figura 42. Vale ressaltar que, devido a escala do mapa geológico utilizado, os escorregamentos estão presentes no basalto da Formação Serra Geral, porém, o que se percebe em campo é que ocorrem no contato desta litologia com os arenitos da Formação Botucatu.

Figura 42 - Distribuição dos escorregamentos planares na área de estudo.



Por fim, a Formação Caturrita, semelhante a Formação Botucatu, se encontra nas proximidades do limite da área da pesquisa (Rebordo do Planalto), mais especificamente em latitudes mais altas, ou seja, ainda mais próximos do limite da área. Presencia altitudes mais baixas (de 40 a até no máximo 200 m) e algumas porções mais elevadas (até no máximo 500 m), consequência das discordâncias geológicas, com declividades mais significativas, sendo até mesmo as mais elevadas da classificação (maior que 35°).

Os Neossolos são solos rasos localizados em boa parte da área de estudo, especificamente na porção central, presenciando hipsometria e declividades variadas, e especificamente declividades mais acentuadas. Os Argissolos, solos constituídos por material mineral, foram divididos em três classificações. A primeira, Argissolo Vermelho-amarelo distrófico, está presente em diferentes porções da área de estudo, mais especificamente numa porção noroeste (boa parte da classe se encontra fora do limite determinado como Rebordo do Planalto nesse ponto), e outra menor, porém efetivamente na área de estudo, nas proximidades da face sul do Rebordo do Planalto, correspondendo as alterações de altimetria, desde as classes mais baixas como menor que 100 m e de 100 a 200m, até hipsometrias mais elevadas, como de 500 s 600 m. Dessa forma, também presenciando algumas declividades expressivas, como as maiores de 35°.

Os Argissolos Vermelho Alumínicos estão presentes numa porção mais restrita, ao leste da área de estudo (próximo a Candelária), com hipsometrias variadas, mais elevadas (entre 500 e 600 m) e declividades mais suaves, sendo predominantemente as menores de 10°, mas também apresentando algumas áreas em outras classes, sendo até as mais declivosas, mas estas últimas em áreas bastante pontuais. Por fim, o Argissolo Bruno-Acinzentado Alítico, presente em grande parte na face norte da área de estudo, correspondendo a hipsometrias médias a mais acentuadas (como de 300 a 400 m e 400 a 500 m e até 500 a 600 m), porém declividades mais modestas, menores de 10°, e entre 10 e 15°. Em alguns pontos, apresenta declividades mais expressivas, mas essas áreas são mais restritas.

A partir dos dados geomorfológicos disponibilizados pelo IBGE, pode-se perceber que, dentro da área de estudo (área de Rebordo do Planalto), dos 61 escorregamentos, 39 se localizaram na classe da Serra Geral, 15 na depressão do rio Jacuí e 7 no Planalto dos Campos Gerais, conforme a Figura 43. A Serra Geral apresenta formas do relevo bastante abruptas com vales fluviais bastante aprofundados e muitos topos de morros angulares ou estreitos, sendo o limite superior da classe definida pelas linhas de escarpa erosiva. A Depressão do Rio Jacuí tem como característica um relevo sem variações altimétricas significativas, apresentando colinas de topos convexos, conhecidas como coxilhas, e alguns morros testemunhos. E por fim, o

Planalto dos Campos Gerais tem como forte característica o recorte a partir das áreas escarpadas da Serra Geral, fragmentada algumas vezes por áreas de relevo mais dissecado (Figura 45).

Com relação ao mapa de solos, após a adição dos movimentos de massa encontrados na pesquisa, percebe-se a distribuição de: 40 em Neossolo Regolítico HúmicoTípico, 13 em Argissolo Vermelho-amarelo distrófico, 5 Argissolo Vermelho Alumínico e 3 movimentos em Argissolo Bruno-Acinzentado Alítico, conforme a Figura 44.

O relevo pode ser classificado como plano a ondulado, com presença de topos de morros tabulares. É expressiva a ocorrência de processos evolutivos de dissecção, sendo que esta unidade também apresenta uma sucessão de colinas e pequenos morros, separadas por amplos vales de fundo achatado, atualmente, recobertos pela vegetação dos campos. Em todas as classes há cicatrizes de escorregamentos, principalmente em morros testemunhos, feição mais atrelada à Depressão do rio Jacuí e a Serra Geral.

Na área de estudo há uma amplitude altimétrica de cerca de 650 m, com as altitudes mais baixas variando próximas a 20 metros (no município de Restinga Seca) ao sudoeste da área, e as mais elevadas em torno de 670, nas proximidades do município de Passa Sete, conforme a Figura 46. Também percebe-se como forte característica a alteração mais abrupta da altitude no limite da face sul do Rebordo do Planalto, que vai de 0-200 para 200-600 metros de altitude, em uma pequena distância, visto que a porção sul da área de estudo (fora da delimitação do Rebordo do Planalto), é a região de menores altitudes, sem a presença de escorregamentos. Também percebe-se que apesar de a altitude variar rapidamente, elas tendem a ser mais elevadas na direção nordeste, em direção aos derrames vulcânicos (Figura 46).

Figura 43 - Distribuição dos escorregamentos planares na litologia da área de estudo.

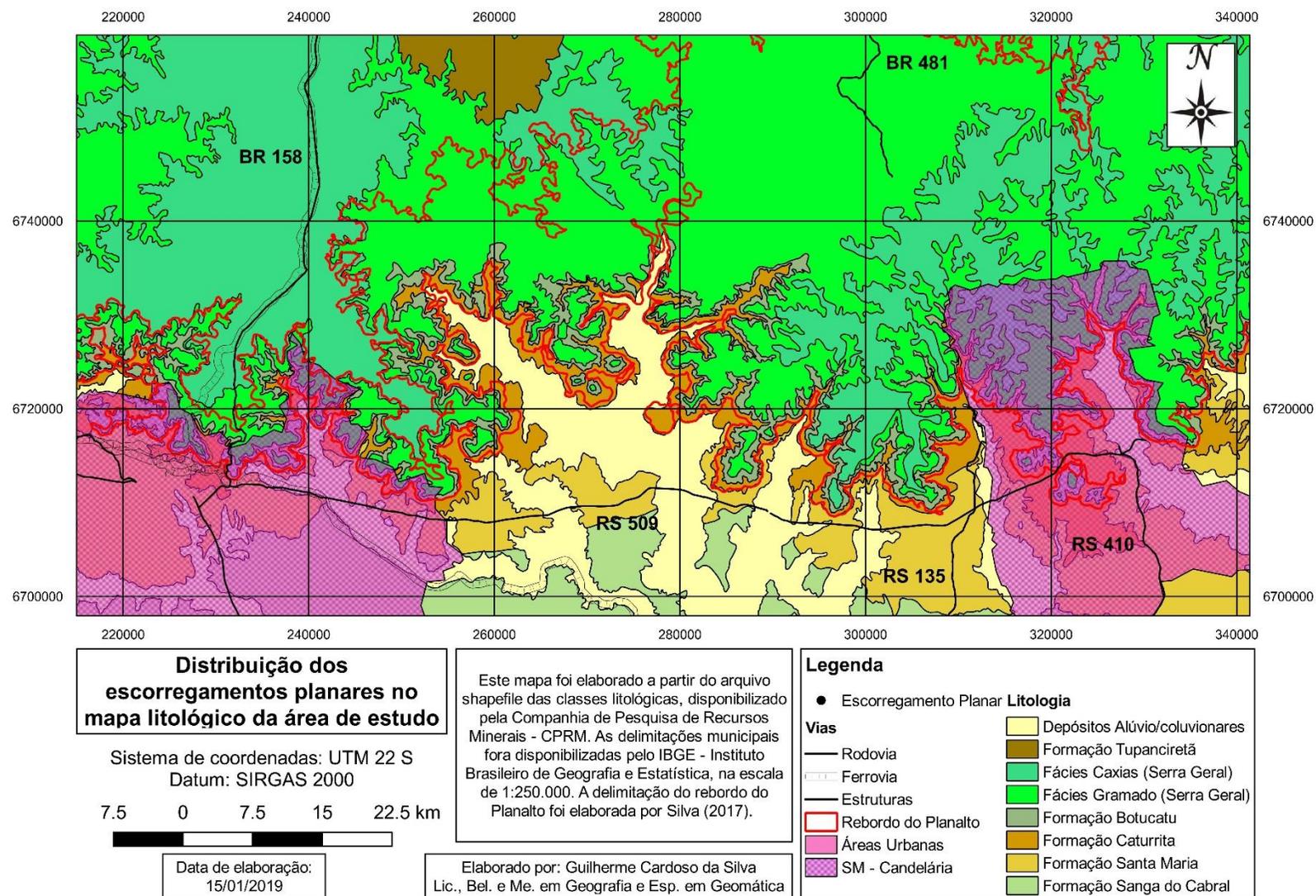


Figura 44 - Distribuição dos escorregamentos planares nos tipos de solo da área de estudo

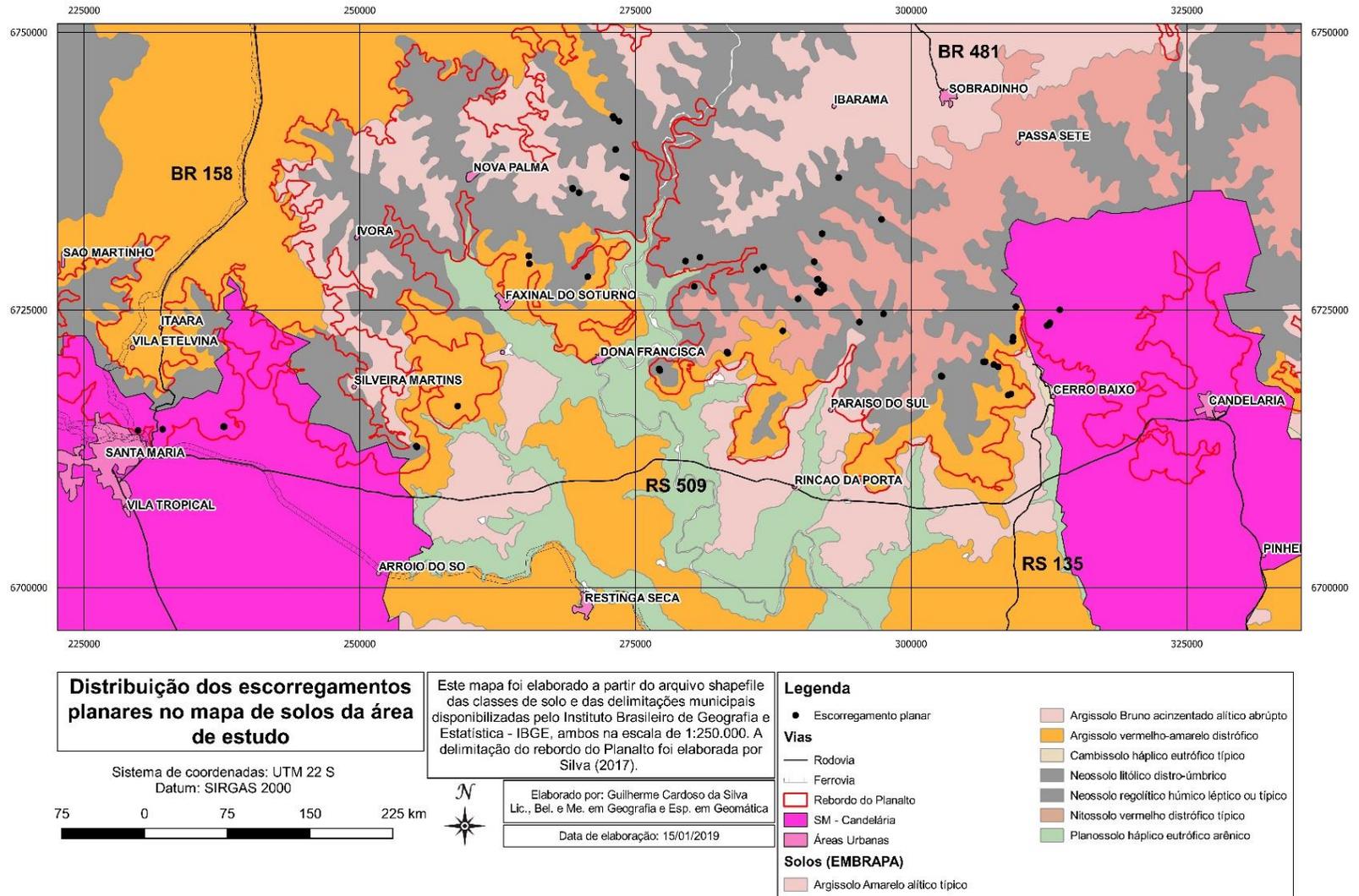
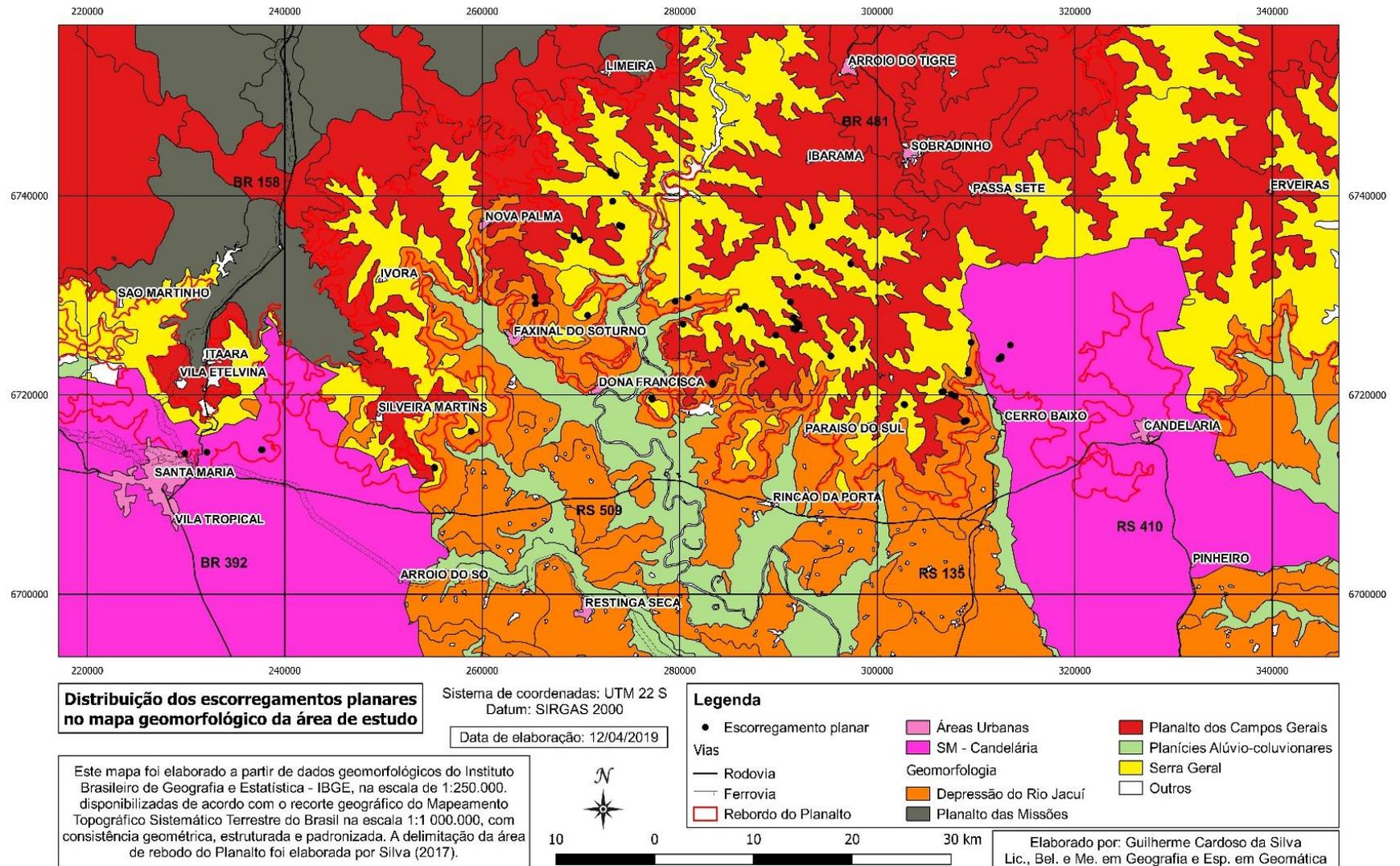


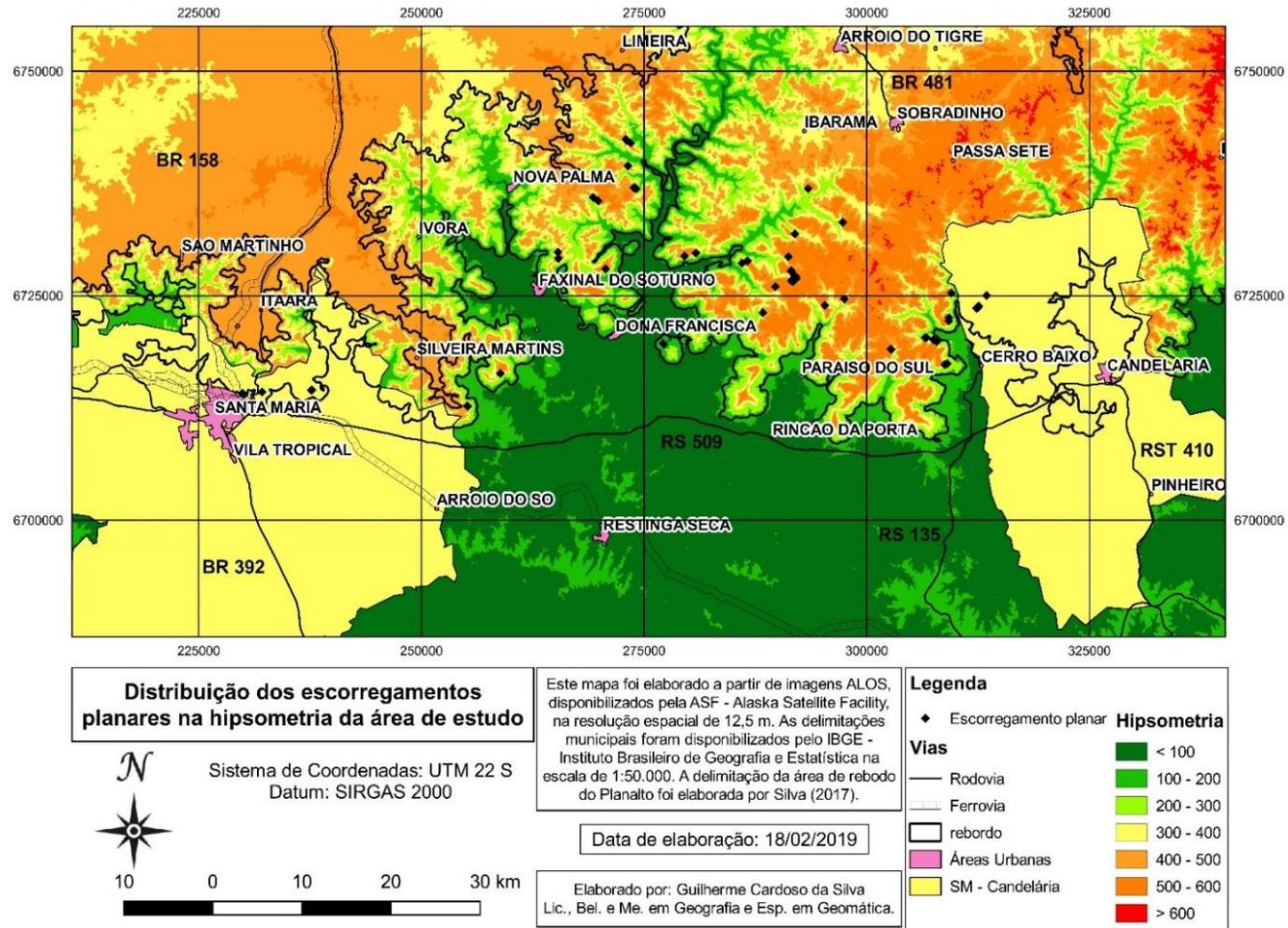
Figura 45 - Distribuição dos escorregamentos planares na geomorfologia da área de estudo.



Do total de 61 escorregamentos, nenhum foi localizado em altitudes inferiores a 100 metros, 1 estava entre 100 e 200 de altitude, 4 entre 200 e 300, 14 entre 300 e 400, 30 entre 400 e 500, 12 entre 500 e 600 e novamente nenhuma ocorrência em altitudes maiores de 600 metros, até mesmo porque essa última classificação ocupa uma área bastante restrita. Apesar da literatura não considerar a hipsometria como um fator determinante na ocorrência dos escorregamentos, já era esperado que eles não ocorressem em altitudes mais baixas, até mesmo porque a probabilidade de possuir vertentes mais inclinadas é menor (o que é corroborado pelo posterior mapa de declividade, em que as áreas menos elevadas não têm como característica declividades acentuadas). Por fim, pode-se perceber uma predominância desses eventos em altitudes médias-altas.

O mapa de declividade é normalmente considerado um fator de grande relevância em movimentos de massa como os escorregamentos. A partir deste mapa percebe-se uma relação bastante interessante, visto que pode-se notar uma discrepância bastante grande entre as declividades dentro e fora dos limites do Rebordo do Planalto, característica já percebida no mapa hipsométrico.

Figura 46 - Distribuição dos escorregamentos planares na hipsometria da área de estudo.



Dentro dos limites da área de estudo nota-se não exatamente um predomínio, mas grandes expressões de declividades mais acentuadas, como as de 20-45% (Forte-Ondulado), 45-75% (Montanhoso) e >75% (Escarpado), principalmente levando em consideração que na porção interna do Rebordo do Planalto) áreas com declividade entre 45 e 75% são raras, e superiores a 75% são quase inexistentes, conforme a Figura 47.

Com relação aos locais em que foram constatados os escorregamentos no mapa de declividade, dividiu-se as classes em intervalos de 5°, com exceção da primeira classe, que partindo do pressuposto da baixa incidência de escorregamentos em declividades mais baixas, esta possui um intervalo de 10° (de 0 a 10°). A partir disso, constatou-se 1 escorregamento na classe de 0 a 10°, 2 entre 10° e 15°, 3 entre 15° e 20°, 3 entre 20° e 25°, 7 entre 25° e 30°, 10 entre 30° e 35° e por fim, 35 em declividades maiores do que 35°. Esses resultados comprovam as hipóteses de que maiores declividades tendem a possuir forte relação com movimentos de massa do tipo escorregamentos.

Devido ao fato de a área de estudo se localizar no hemisfério sul, mais especificamente abaixo do Trópico de Capricórnio, que passa pelo Brasil nos estados do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul, destaca-se que as vertentes voltadas ao norte recebem a radiação solar de forma mais intensa, sendo, em tese, mais quentes e secas. Da mesma forma, as vertentes voltadas ao sul tendem a receber menor radiação, sendo então mais frias e úmidas. Esta variável foi relacionada aos escorregamentos buscando uma relação entre a instabilização das vertentes e a sua umidade obtida da orientação em relação a exposição solar.

Com relação às orientações de vertente, percebe-se uma homogeneidade na distribuição das orientações, conforme a Figura 48. Dentro deste contexto, percebe-se que dos 61 escorregamentos, 15 estão presentes na classe nordeste, 12 a sudeste, 9 a leste, 9 a sul, 7 a sudoeste, 6 a norte, 2 a oeste e 1 a noroeste. Assim, percebe-se que os escorregamentos ocorreram em todas as orientações e um maior número de escorregamentos ocorreu na orientação nordeste (15 casos).

Figura 47 - Distribuição dos escorregamentos planares na declividade da área de estudo.

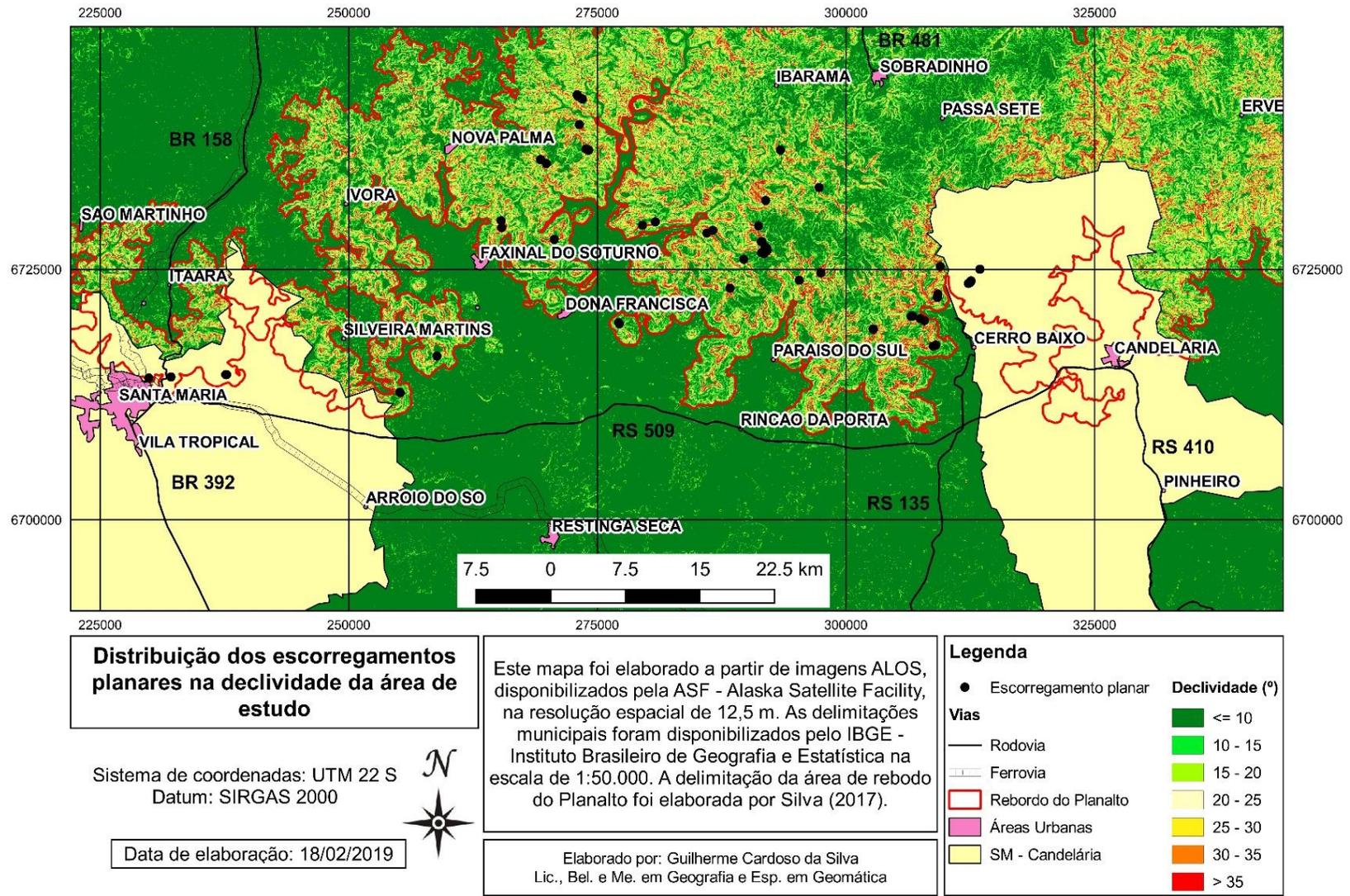
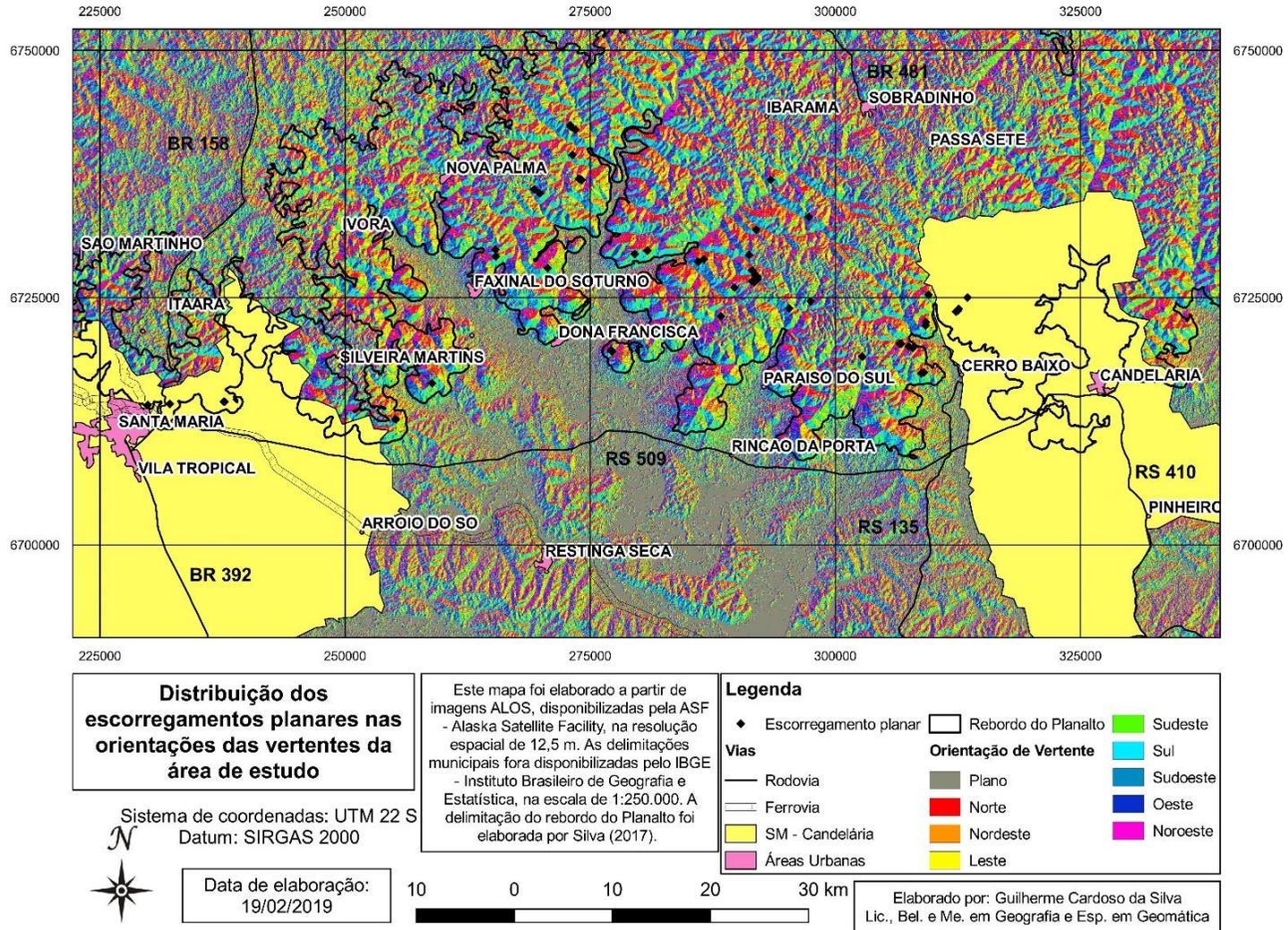


Figura 48 - Mapa de orientação de vertente da área de estudo com a localização dos movimentos de massa



Além da análise já realizada sobre a latitude (Trópico de Capricórnio) e a relação com a radiação solar, também pode-se estabelecer algumas relações com às massas de ar e a umidade. Nesse contexto, um ponto importante a se destacar é que a maioria das precipitações no RS provêm do quadrante Sul, logo, o alinhamento do Rebordo é perpendicular a esse deslocamento, sendo assim, a primeira barreira em solo que as frentes polares encontram no estado. Conforme Sartori (2003), a variação espacial da chuva sofre, até certo ponto, a influência do relevo, já que o estado possui a Serra Geral no seu setor central, com alinhamento perpendicular à direção geral de deslocamento das frentes polares, esta que se caracteriza primordialmente como de sudoeste para nordeste (SW => NE), desde o extremo sul do Oceano Pacífico, até as latitudes tropicais do Oceano Atlântico, o que determina alterações no volume pluviométrico registrado nas regiões climáticas estado. Isso relaciona as questões climáticas com a geomorfologia já apresentada na presente pesquisa, e também com as orientações de vertente.

Ainda conforme Sartori (2003), a posição subtropical faz com que o estado do Rio Grande do Sul presencie o confronto recorrente entre forças opostas, provocado pelo avanço dos Sistemas Atmosféricos de origem polar em direção aos polares tropicalizados (Massa Polar Velha - MPV) ou aos sistemas de origem tropical (Massa Tropical Atlântica ou Continental), proporcionando a distribuição das chuvas durante todo o ano, motivada pelas sucessivas passagens frontais, sem ocorrência de estação seca no regime pluviométrico, salvo exceções climáticas. A autora ainda comenta que os Sistemas Extratropicais controlam a circulação secundária regional em qualquer estação do ano, e são representados pela Massa Polar Atlântica (MPA), MPV e Frente Polar Atlântica (FPA), esta última que também é conhecida como Frente Fria. A participação dos Sistemas Intertropicais é pequena, representados pela Massa Tropical Atlântica (MTA), ou Continentalizada (MTAc), Massa Tropical Continental (MTC), Frente Quente de Nordeste e Instabilidades Tropicais, mais atuantes nas fases pré-frontais, por no máximo dois dias consecutivos e em qualquer época do ano.

É também importante se destacar o Tempo Frontal de Sudoeste de Atuação Moderada, que provocado pela passagem normal da FPA, sem estacionar sobre o estado, origina uma densa nebulosidade e chuvas de volume razoável ( $> 50$  mm), com ventos do quadrante norte. Dependendo da época do ano e da intensidade do aquecimento pré-frontal, as nuvens cúmulos-nimbos podem provocar temporais com chuvas fortes e queda de granizo. Não ocorre recuo da FPA e os ventos geralmente são variáveis em direção e intensidade, com pequena amplitude térmica. A esse tipo de tempo frontal, com duração de no máximo dois dias, segue-se o domínio da MPA. Ainda é pertinente comentar sobre o Tempo Frontal de Nordeste, já que relaciona-se

à participação de uma frente quente, resultante do recuo da Frente Polar para o estado depois de já estar sobre Santa Catarina ou Paraná, caracterizando-se por chuvas fortes, relâmpagos e trovoadas, ventos variáveis em direção e intensidade e pequena amplitude (SARTORI, 2003).

Se for feita uma relação com o fato das vertentes ao sul serem mais úmidas, teoricamente favoráveis aos escorregamentos, ao contrário das vertentes voltadas a norte, que por terem maior incidência de radiação solar, são mais secas, percebe-se que realmente as vertentes voltadas a sul tiveram um número maior de escorregamentos (9), se comparadas as voltadas a norte (6), porém esta diferença não é muito significativa. Em uma análise um pouco mais ampla, comparando noroeste, norte e nordeste, como sudeste, sul e sudoeste, percebe-se um total de 22 movimentos no primeiro grupo, e 28 no segundo.

Apesar de novamente este resultado ser favorável à teoria, a diferença não é muito expressiva, principalmente se levar em consideração que a orientação de vertente com mais escorregamento é a nordeste, que teoricamente é mais seca se comparada as voltadas a sul, sudoeste e sudeste. Isso mostra que apesar de os dados de orientação de vertentes serem importantes de serem analisados, talvez não sejam os mais significativos para resposta do modelo. Além disso, reforça que muitas vezes as respostas de determinados mapeamentos podem não ser o esperado, ou o padrão, devido a importância da interação de outros fatores na ocorrência dos escorregamentos.

Visando outras formas de analisar as orientações de vertente, optou-se por reclassificar as orientações não mais em 9, mas em 17 classes. Trata-se dos pontos cardeais e colaterais (como no mapeamento anterior), somados aos pontos subcolaterais, sendo eles: nor-nordeste, nor-noroeste, sul-sudeste, sul-sudoeste, lés-nordeste, lés-sudeste, oés-sudeste e oés-sudoeste. Cabe destacar que há, novamente, a classificação de áreas planas. A relação dos pontos do inventário de escorregamentos com esta classificação foi a seguinte: 3 escorregamentos a norte, 5 a nor-nordeste, 6 a nordeste, 8 a les-nordeste, 3 a leste, 4 a les-sudeste, 4 a sudeste, 11 a sul-sudeste, 4 a sul, 2 a sul-sudoeste, 5 a sudoeste, 3 a oés-sudoeste, 3 a nor-noroeste e nenhum escorregamento nas classificações oeste, oés-noroeste, noroeste e plano. Pode-se perceber assim uma significativa concentração dos escorregamentos na orientação sul-sudeste, relacionadas a maior umidade das vertentes voltadas para o sul.

A partir de então, visando agora uma classificação mais generalista, dividiu-se as orientações apenas nos pontos cardeais (norte, sul, leste e oeste). Nesta classificação o resultado obtido foi: 13 escorregamentos a norte, 21 a leste, 20 a sul e 7 a oeste. Esta classificação não revelou nenhum destaque, visto que apesar de a orientação leste ter apresentado o maior número de escorregamentos, a orientação sul apresentou apenas um movimento a menos.

Analisando as três classificações de orientação de vertente, percebeu-se então que a mais generalista delas (pontos cardeais), revelou uma preferência pela orientação leste, seguida pela sul. A classificação normalmente mais utilizada (pontos cardeais e colaterais) apresentou uma preferência pela orientação nordeste, e por fim a classificação mais específica (acrescentados os pontos subcolaterais) apresentou uma preferência pela orientação sul-sudeste. Isso mostra que dependendo da classificação utilizada, obtém-se diferentes respostas e que apesar de uma aparente relação entre a classificação mais generalista (apontando para leste e sul) e a mais específica (forte indicação para sul-sudeste), a classificação intermediária parece apresentar uma orientação diferente (noroeste), o que deixa claro que tudo é uma questão de classificação e que para a posterior análise do valor informativo, pode ser pertinente utilizar uma classificação em que se pode destacar as classes mais influentes (como no caso da classificação em 8 e 16 classes), e ainda levando em consideração possíveis semelhanças entre classificações (como ao comparar a classificação de quatro orientações com a de 16). Levando essas questões em consideração, a classificação dos pontos subcolaterais (16 classes) parece fornecer uma boa resposta.

Para complementar os dados anteriores sobre as orientações de vertentes, foram elaborados seis mapas em que foram calculadas as áreas de cada classe. Foram então três mapas (com 4, 8 e 16 classes) de toda a cena de imagens ALOS utilizadas nos mapas da presente pesquisa, e novamente três mapas, com os mesmos parâmetros, apenas para a porção do Rebordo do planalto. Pôde-se constatar o predomínio das áreas planas nos mapas de área total com a utilização de 8 e 16 orientações, sendo que no de 4 classes, apesar de não predominar, teve-se um valor bastante próximo dos demais, inclusive mais alto que o valor das vertentes voltadas a norte. Já na análise das orientações apenas na porção interna do Rebordo do Planalto, nota-se que as áreas planas foram as de menor área nas três classificações, da mesma maneira que as vertentes voltadas a sul, mesmo que de maneira sutil, predominaram também nas três classificações.

Sobre a curvatura em perfil, nota-se uma grande alternância de vertentes côncavas e convexas em sua maioria, e a presença de vertentes retilíneas acaba sendo mais restrita, primeiramente por ser uma realidade mais difícil de ser encontrada na natureza, e também pela própria distribuição dos valores adotados em ambiente SIG, já que as vertentes retilíneas são apenas as classificadas entre -0,075 e 0,075, ao passo que as convexas variaram de -0,075 e -14,7 e as côncavas de 0,075 a 8,32. Isso levando em consideração a aplicação da ferramenta *Focal Statistics*, pois o mapeamento inicial possuía uma variação ainda maior, de -26 a -0,075 e 0,075 a 34. De maneira geral, esta representação pode ser observada na Figura 51.

Com a análise dos dados, constatou-se que dos 61 escorregamentos, 35 movimentos estavam contidos em vertentes de perfil convexo, 18 em perfil côncavo e ainda 8 se encontraram em vertentes de perfil retilíneo. Apesar de ser difícil de ser estabelecida uma vertente retilínea na natureza, seis movimentos estavam estabelecidos em píxeis de valores próximos a zero, ou seja, não eram vertentes convexas, nem côncavas.

Para colaborar nas conferências, elaboraram-se alguns perfis, tanto em SIG quanto no Google Earth, com a finalidade de estabelecer os melhores parâmetros visando a melhor representação do terreno. Foram criados oito perfis comparativos, além de alguns quadrantes, também utilizando a comparação com imagens de satélite disponibilizadas pelos SIGs, como pode ser observado nas Figuras 49 e 50

Na Figura 49 pode-se perceber que, guardadas as particularidades dos respectivos *softwares*, não só o perfil de curvatura, mas também o plano, a declividade e até mesmo a hipsometria possuem uma boa correspondência. Há de se levar em consideração, logicamente, particularidades do modelo 3D gerado pelo Google Earth Pro, e pelo MDE utilizado no SIG, que como já descrito, se trata de imagens ALOS PALSAR de 12,5 metros de resolução espacial (Figura 51).

Figura 49 - Mapa de perfil de curvatura da área de estudo com a localização dos movimentos de massa.

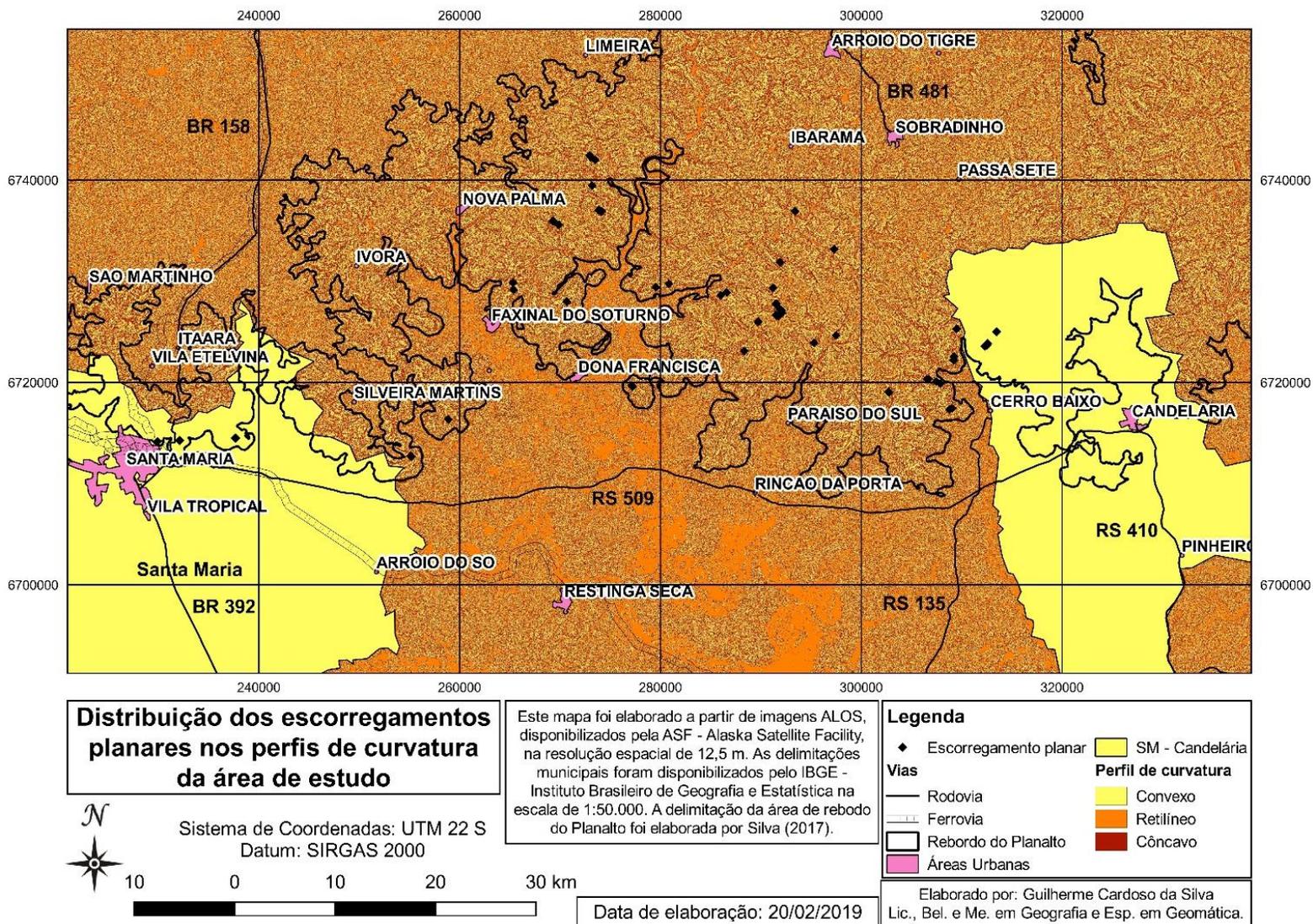
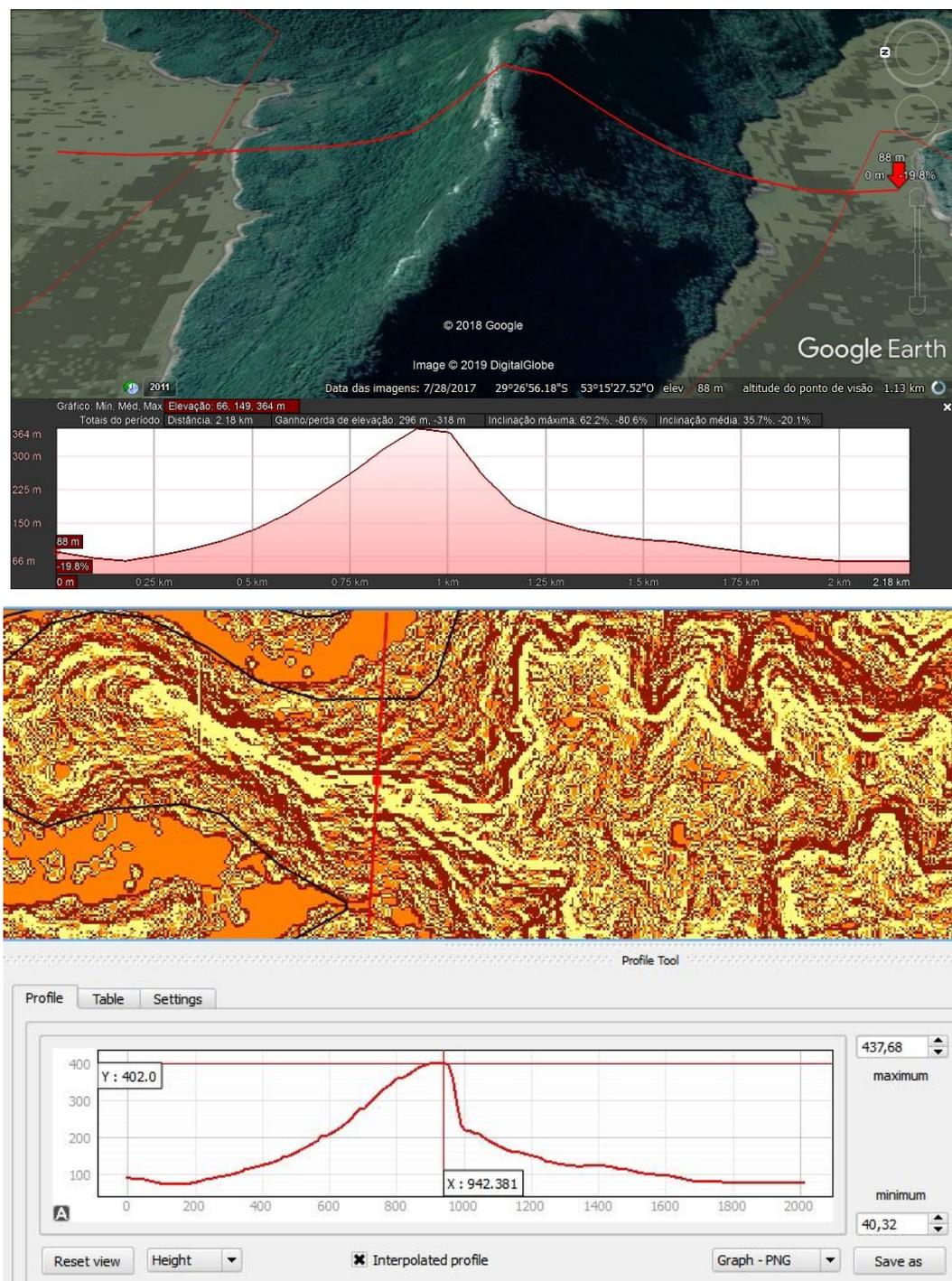
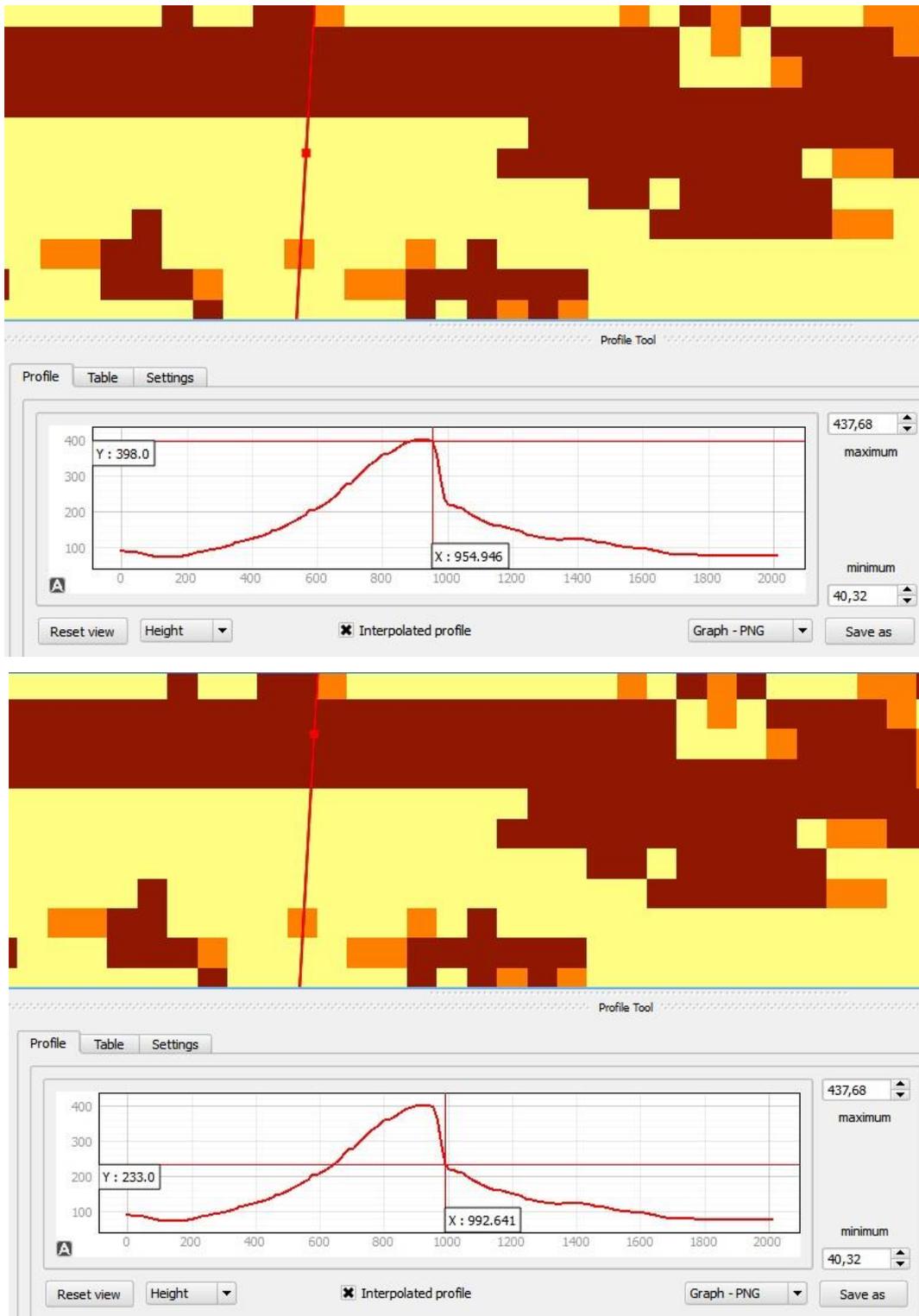


Figura 50 - Comparação entre o perfil de elevação do Google Earth Pro e do MDE em ambiente SIG.



Fonte: Autor.

Figura 51 - Comparação do perfil de elevação do MDE com o mapa de perfil de curvatura.

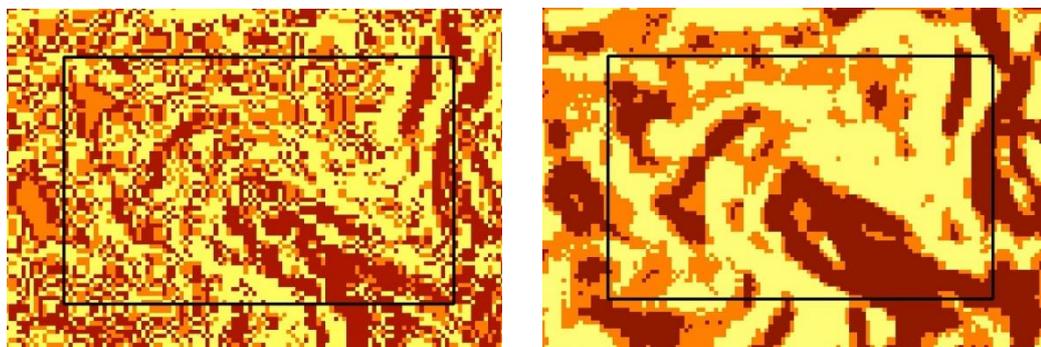


Fonte: Autor.

De maneira semelhante, a conferência da Figura 51 objetivou um maior detalhamento na análise, agora comparando o perfil de elevação gerado a partir do MDE com o resultado do processamento do perfil de curvatura. Na imagem superior, percebe-se que o ponto vermelho da imagem está sobre a cor amarela, que representa os valores abaixo de  $-0,075$ , ou seja, as vertentes convexas. Desta forma, no perfil correspondente, nota-se a convexidade da curva representada. No mesmo contexto, a imagem inferior apresenta o ponto vermelho na imagem sobre a cor marrom, que representa valores positivos acima de  $0,075$ , que neste caso expressam as vertentes côncavas. Comparando com o perfil gerado a partir do MDE, nota-se, neste mesmo ponto, a concavidade da curva representada.

Pelo fato de alguns píxeis se apresentarem de forma bastante variada dentro da área de estudo, optou-se por aplicar a ferramenta *focal statistics*, que executa uma estatística dos valores para a localização de cada *pixel* de entrada de acordo com uma vizinhança específica em torno dela, que no caso foi em um raio de três píxeis (análise circular). A aplicação desta ferramenta resultou em um mapeamento mais unificado, e a comparação entre o trabalho original e o ajustado é apresentado na Figura 52.

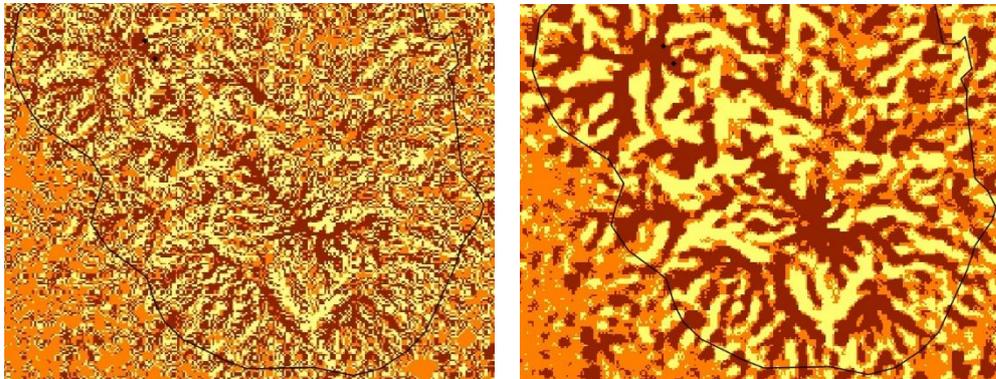
Figura 52 - Comparativo entre o perfil de curvatura original e após a aplicação da ferramenta Focal Statistics (ArcGIS).



Fonte: Autor.

Com relação ao Plano de curvatura, novamente teve-se cuidado para representar o terreno da melhor maneira possível. Para isso, também julgou-se necessário o uso da ferramenta *Focal Statistics*, que claramente uniformizou a temática e permitiu uma visualização mais homogênea da área e conseqüentemente uma classificação mais realista, como pode ser visto na Figura 53.

Figura 53 - Comparativo entre o plano de curvatura original e após a aplicação da ferramenta Focal Statistics (ArcGIS).

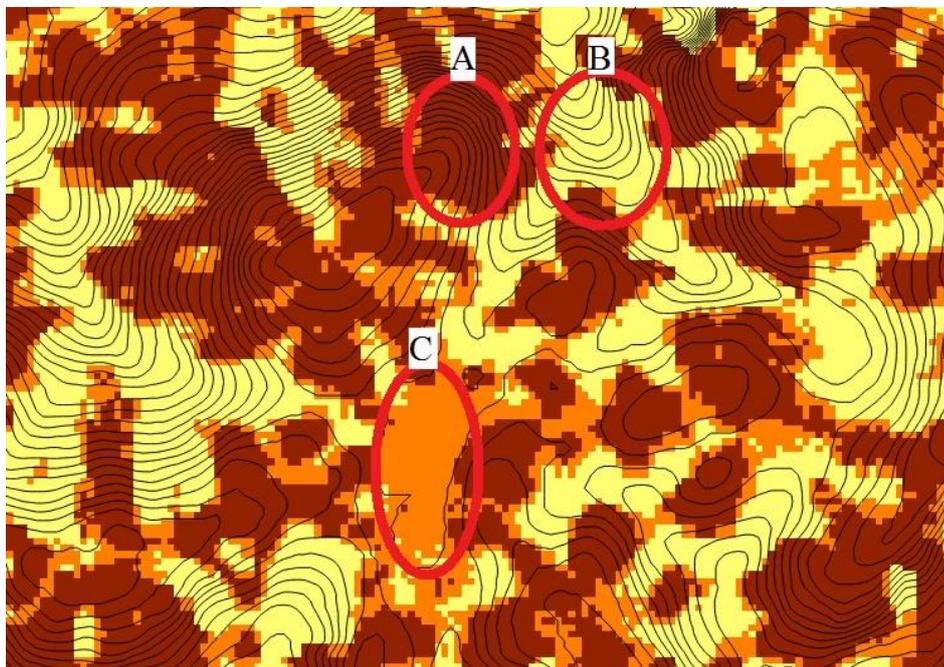


Fonte: Autor.

Utilizou-se novamente de uma varredura com o raio de 3 píxeis em formato circular, por ser considerada uma maneira bastante fiel de reclassificar os dados. É claro que surge um questionamento sobre a perda da qualidade do dado, visto que essa homogeneização dá uma aparência de perda de detalhamento. Porém, se tratando da representação da natureza e sabendo da limitação da base de dados (imagem ALOS), pode-se ter benefícios desse tipo de estratégia, pois prováveis ruídos na imagem, além de confusões entre terreno e elevação (comuns nesse tipo de dado) podem ser suprimidos ao entrarem para a média dos demais píxeis.

Assim como no resultado do perfil de curvatura, também para o plano de curvatura houve uma preocupação com a conferência dos dados apresentados pelos processamentos em SIG. Desta forma, extraiu-se as curvas de nível do MDE original, e devido ao fato de a imagem ALOS PALSAR possuir uma resolução espacial de 12,5 metros, optou-se por extrair as curvas com equidistância de 10 metros, considerando um bom parâmetro para a comparação. Na Figura 54 pode-se constatar a boa correspondência do mapa de Plano de curvatura final, com as curvas de nível extraídas das imagens ALOS.

Figura 54 - Uso das curvas de nível extraídas do MDE para conferência com a classificação do plano de curvatura.



Fonte: Autor.

Pode-se perceber uma boa correspondência em toda a imagem, assim como em toda a área de estudo. É claro que a representação do terreno nunca será perfeita, principalmente em toda extensão da área, porém a correspondência é bastante positiva. Como exemplo, destacaram-se três diferentes exemplos, A, B e C. Em A, notam-se curvas de nível claramente divergentes, correspondendo com a cor marrom, que representavam píxeis positivos (acima de 0,075). Em B, notam-se curvas de nível convergentes, correspondendo com a cor amarela, que representam valores negativos abaixo de -0,075. Por fim, em C, tem-se áreas planas, que correspondem ao vazio de curvas de nível, representando valores entre -0,075 e +0,075. Conforme a Figura 55, constatou-se que dos 61 escorregamentos, 16 estavam localizados em vertentes convergentes, 10 em planas e 39 em divergentes.

De posse dos dados de perfil e plano de curvatura, foi possível o cruzamento de ambos os resultados na intenção de melhor compreender a forma da vertente. Desta maneira, a partir da ferramenta *Raster Calculator* do *software* ArcGIS, pode-se ter o mapa de perfil e plano de curvatura combinado, conforme a Figura 56.

Figura 55 - Mapa de plano de curvatura da área de estudo com a localização dos escorregamentos.

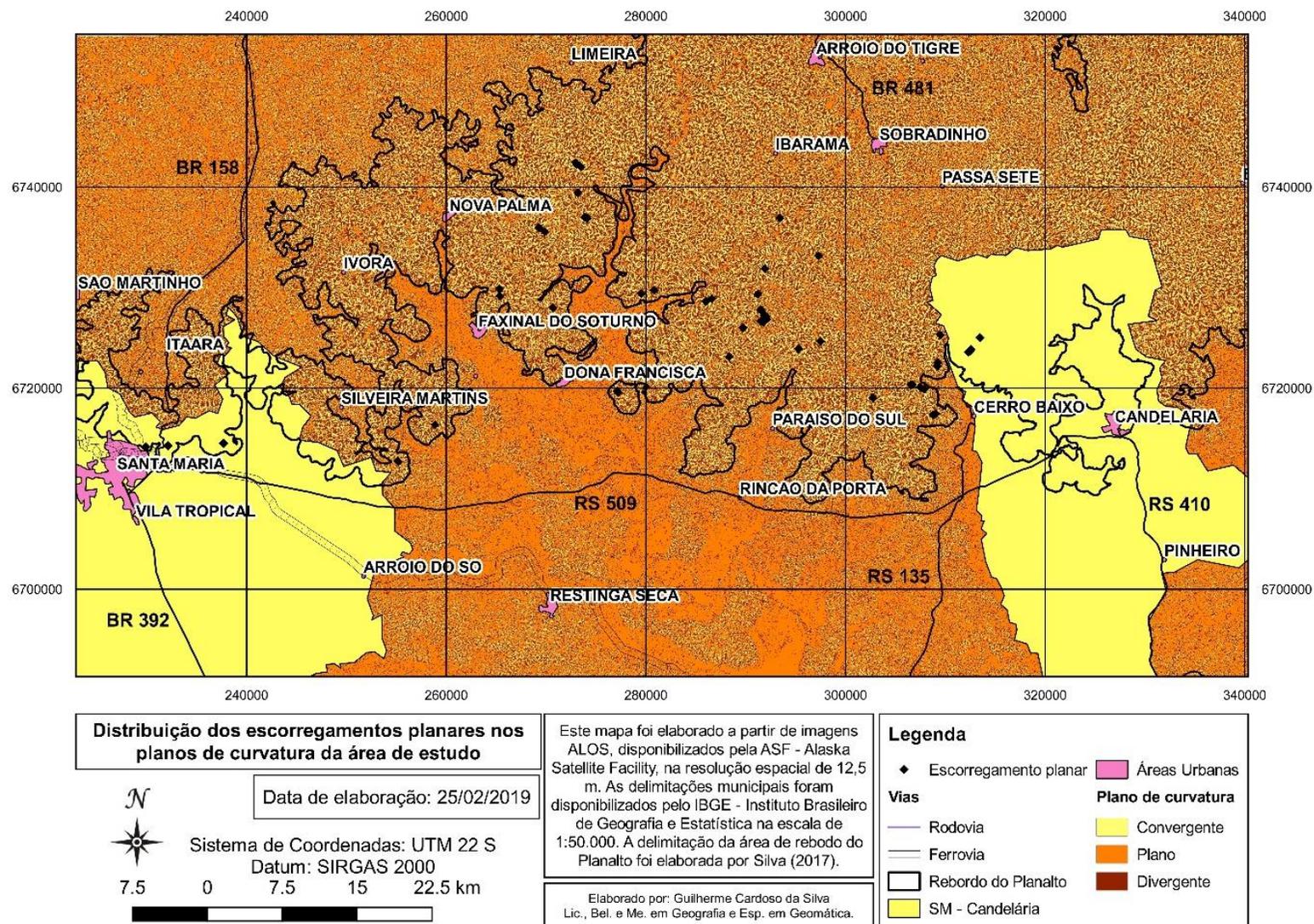
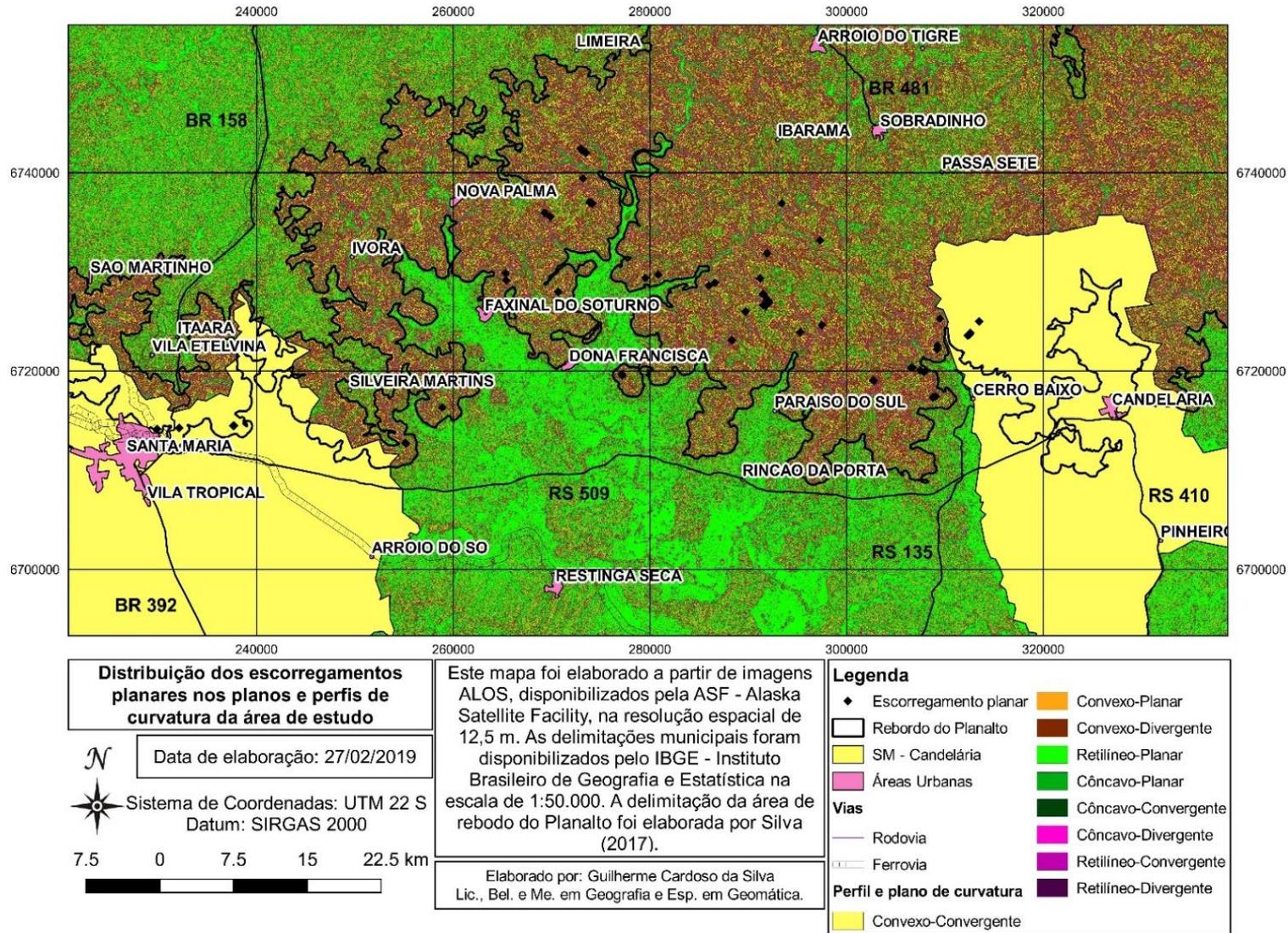


Figura 56 - Mapa de perfil e plano de curvatura para a área de estudo com a localização dos escorregamentos.



Como resultado desta análise, pode-se perceber que das nove possíveis combinações (resultado da multiplicação de três perfis com três planos de curvatura), 6 (seis) foram mais evidentes, sendo elas: convexo-convergente, convexo-planar, convexo-divergente, retilíneo-planar, côncavo-planar e côncavo-divergente.

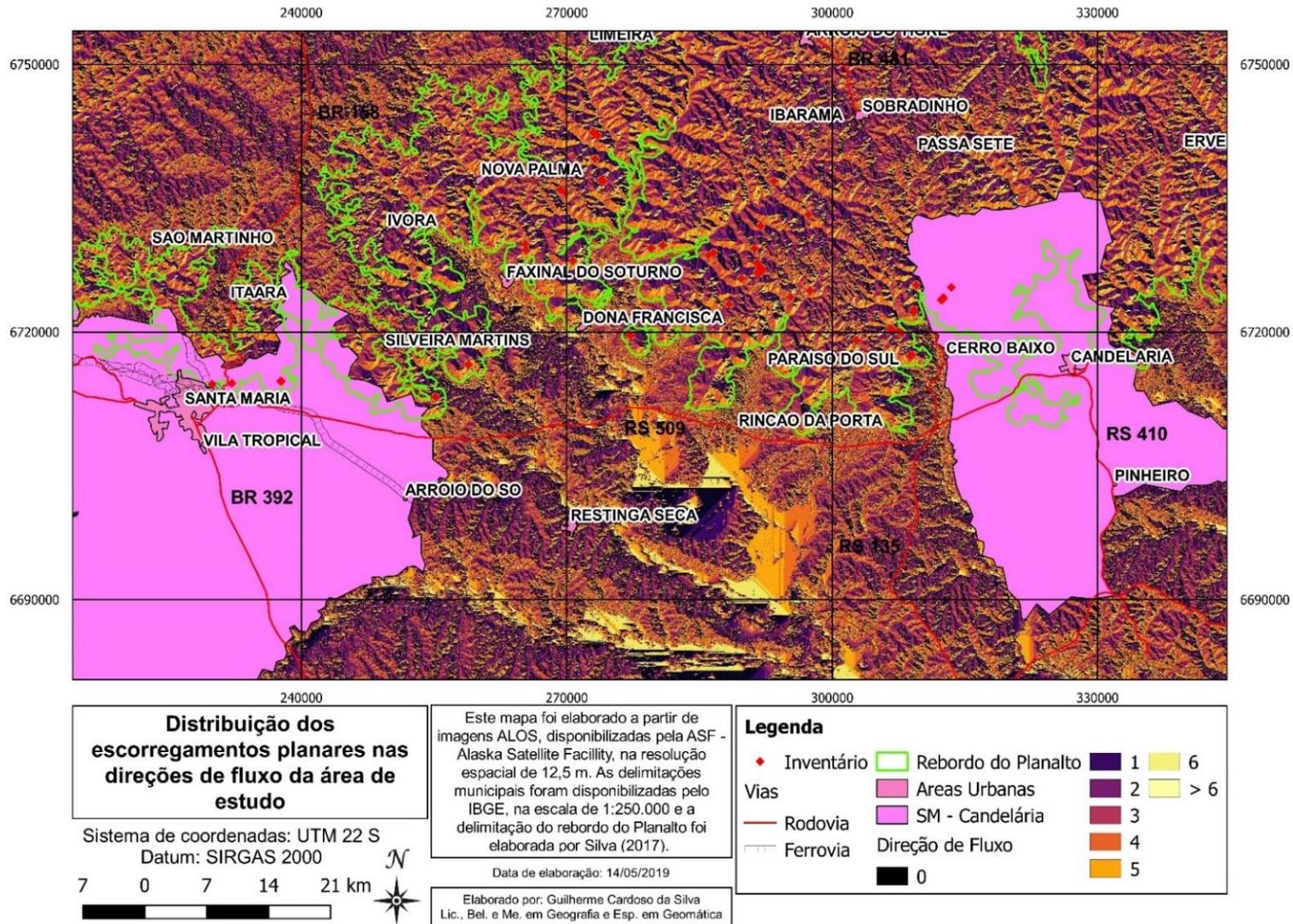
De acordo com a análise da localização dos 61 escorregamentos, constatou-se que 32 estavam presentes em vertentes convexo-divergente, 7 estavam em vertentes convexo-convergente, 7 em côncavo-divergente, 6 em convexo-planar, 6 em côncavo-planar e 3 em vertentes retilíneo-planar. Por fim, não foram constatados escorregamentos em vertentes retilíneo-divergente, retilíneo-convergente e côncavo-convergente.

Na direção de fluxo realizada a partir do  $D_{\infty}$ , tirando uma amostra de um *pixel* específico desta região o valor correspondente foi de 2,75, ou seja, visto que o valor mais próximo é 3, esta orientação corresponderia também a norte, ou, mais especificamente, algo como nor-nordeste. Em “B”, nota-se a predominância das direções leste e nordeste na classificação D8. Nos píxeis marcados como leste (em amarelo), o processamento  $D_{\infty}$  apresentou valores entre 0 e 0,3, correspondentes à leste, já os píxeis marcados como nordeste (laranja), tiveram valores de *pixel* entre 0,4 e 0,8, correspondendo assim a direções entre leste e nordeste, mais especificamente algo como Lés–nordeste.

Comprovada a relação entre os processamentos, após outras conferências dentro da área de estudo, realizou-se o mapa de direção de fluxo com o método D-Infinity, como apresentado na Figura 57. Com os 61 escorregamentos nesse mapa, constatou-se que, dividindo os píxeis de 1 em 1, visto que os valores vão de 0 a 6,28, 16 se localizaram entre 0 e 1, 11 entre 1 e 2, nenhum entre 2 e 3, 8 entre 3 e 4, 7 entre 4 e 5, 18 entre 5 e 6 e 1 na classe maior que 6. Desta maneira, a classe com maior número de escorregamentos (entre 5 e 6), correspondem às orientações de oeste a sul, e a classe com nenhum escorregamento (entre 2 e 3) corresponde entre nordeste e noroeste.

Um dado ainda mais específico neste contexto é o processamento de fluxo acumulado, que pode ser entendido como um passo adiante da direção de fluxo, visto que a partir das direções, ter-se-á um valor de acumulação de água em determinado *pixel*. Assim, optou-se por testar um método de múltiplas direções (*Multiple Flow Direction*).

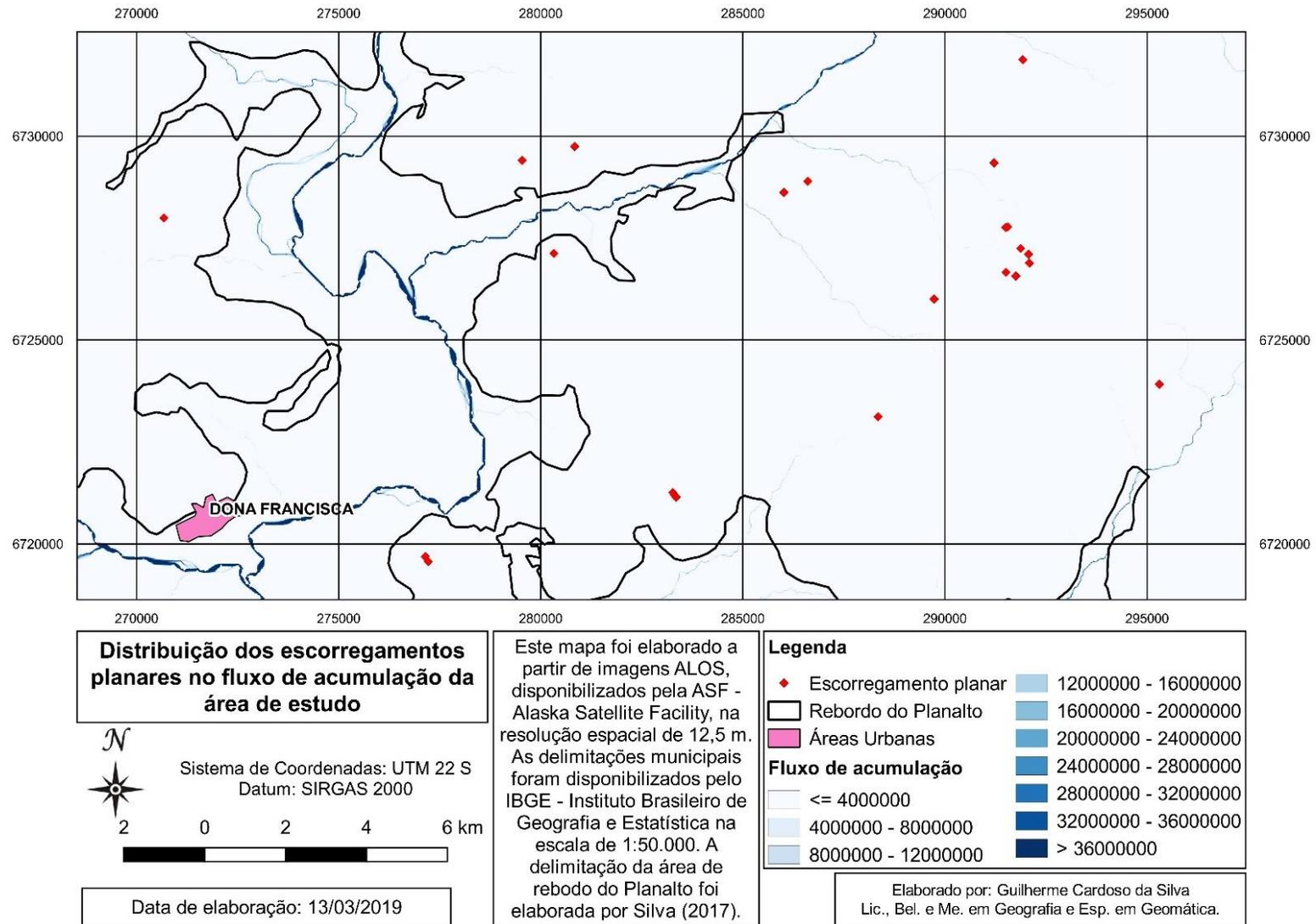
Figura 57 - Mapa de direção de fluxo (D-infinity) da área de estudo com a localização dos escorregamentos.



Para tal atividade, testou-se diferentes ferramentas, como a *r.terraflow* no GRASS 7 (pelo QGIS) e posteriormente no *software* SAGA 2.3.2, utilizado em sua versão independente do QGIS. O resultado deste processamento pode ser observado na Figura 58 em que o mapa é apresentado com uma escala maior, em virtude de melhor apresentar o resultado do processamento. De acordo com as análises do SAGA GIS, percebe-se uma boa consistência dos dados, com relação aos outros mapeamentos previamente gerados, tendo o *software* elaborado uma escala de valores que variavam mais ou menos de 4000000 a 40000000, com uma divisão em 10 classes, sendo elas: >4000000; 4000000-8000000; 8000000-12000000; 12000000-16000000; 16000000-20000000; 20000000-24000000; 24000000-28000000; 28000000-32000000; 32000000-36000000 e >36000000. Cabe destacar que esta escala foi dada na intenção de melhor representar os dados do fluxo de acumulação no mapa final, porém ela seria muito mais extensa, com valores que vão de cerca de 150, até aproximadamente 60000000.

A partir do cruzamento dos locais de escorregamento com o mapa de fluxo acumulado, percebeu-se que os dados variaram entre 253 e 28763, entre os 61 movimentos, e se distribuídos na escala original do mapeamento, todos estariam contidos na primeira classificação (abaixo de 4000000). Isso se deve ao fato de que, obviamente, as áreas com maior grau de fluxo acumulado são as áreas mais baixas, que, salvo alguma exceção, são representadas por cursos d'água mais expressivos. De maneira semelhante, outros acumulados menos expressivos, mas ainda assim significativos, são representações de cursos de primeira e segunda ordem. Desta maneira, já era esperado que movimentos de massa do tipo escorregamento não fossem localizados nestas regiões, pois apesar de o fluxo acumulado ter potencial para deflagrar estes fenômenos, dificilmente eles ocorreriam nos locais em que o fluxo acumulado é mais expressivo, justamente por se tratarem de zonas com cotas altimétricas e declividades pouco significativas.

Figura 58 - Mapa de fluxo acumulado da área de estudo com a localização dos escorregamentos.



Diante do exposto, percebeu-se que subtraindo o maior valor de fluxo acumulado do menor, tem-se cerca de 28511 de valor de *pixel*. Ainda se destaca a existência de um valor bastante acima da média, o que forçou a escala a ser consideravelmente maior do que poderia ter sido se este fosse retirado. Desta maneira, considerou-se efetiva uma classificação em oito unidades, sendo elas: <1000; 1000-2000; 2000-3000; 3000-4000; 4000-5000; 5000-6000; 6000-7000 e >7000. Assim, constatou-se que 28 movimentos estavam presentes na classe menor que 1000, 21 entre 1000 e 2000, 4 em 2000-3000, 2 em 3000-4000, 2 em 4000-5000, 1 em 5000-6000, 1 em 6000-7000 e 2 na classe maior que 7000.

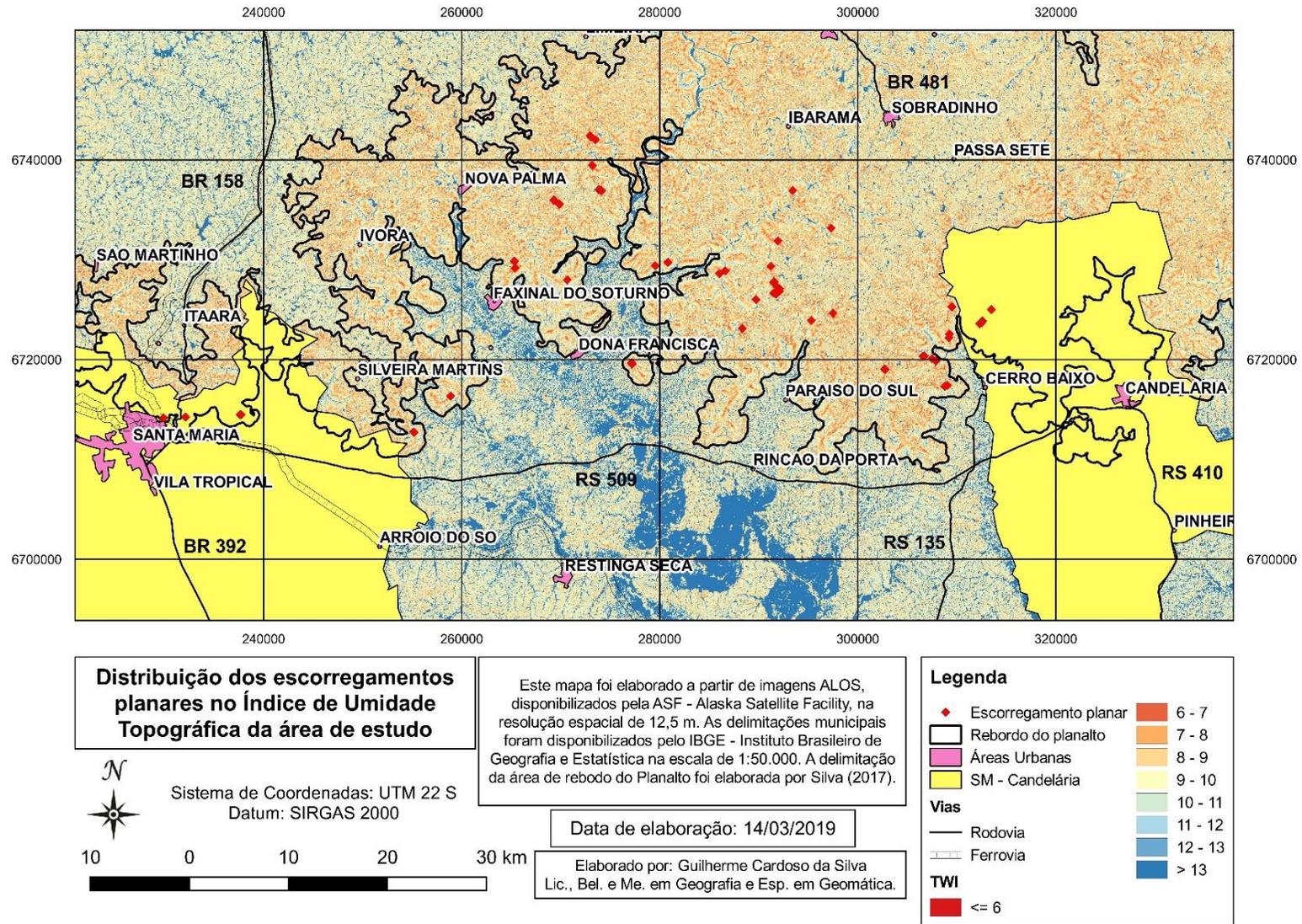
A partir de então, foi elaborado o mapa do Índice de Umidade Topográfica (*Topographic Wetness Index – TWI*), que se trata de um atributo secundário que é bastante utilizado em pesquisas recentes sobre movimentos de massa do tipo escorregamentos. O TWI apresenta o logaritmo natural da divisão do fluxo de acumulação pela tangente da declividade, como já explicado no presente trabalho. O resultado deste processamento pode ser observado na Figura 59.

Percebeu-se a correspondência de áreas úmidas com porções menos declivosas, e o contrário também foi verdadeiro, o que foi bastante positivo para este trabalho, visto que os dados se mostraram fidedignos. Também foram notadas porções mais expressivas de áreas úmidas na face sul do Rebordo do Planalto, o que corresponde às áreas de menor declividade, quando comparada a área interna, com declividades mais acentuadas e, conseqüentemente, um volume maior de áreas com valores de umidade topográfica mais baixos.

O processamento do TWI foi realizado tanto no ArcGIS quanto no SAGA GIS, optando-se pelo resultado do segundo, devido a uma maior correspondência com a realidade e uma homogeneização maior dos dados. Para tal, foram utilizados os dados de fluxo de acumulação (MDF) e a declividade (em radianos). Observou-se uma amplitude dos valores de *pixel* semelhante com a metodologia aplicada em ambos os *softwares*, porém no SAGA GIS eles foram um pouco mais elevados, variando entre 4,5 25,8, ao passo que na ArcGIS os valores eram de -1,5 e 22,1.

Para a representação do mapa, optou-se pela divisão em 9 classes: <6; 6-7; 7-8; 8-9; 9-10; 10-11; 11-12; 12-13 e >13. Percebe-se que nenhum escorregamento esteve localizado em píxeis com valores abaixo de 6 (primeira classe), 17 entre 6 e 7, 32 entre 7 e 8, 10 entre 8 e 9, 1 entre 9 e 10, nenhum entre 10 e 11, 1 entre 11 e 12 e nenhum entre 12 e 13 ou maior que 13.

Figura 59 - Mapa de TWI (Topographic Wetness Index) da área de estudo com a localização dos escorregamentos.



### 5.3 MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO

Após os novos processamentos (redução da área inicial), verificou-se que os valores informativos não se alteraram de maneira significativa, logo os resultados de taxa de sucesso e predição foram bastante semelhantes, o que mostra que o novo recorte não se apresentou tendencioso, e sim apenas mais fiel às classes que efetivamente interferiram no modelo. A única temática que apresentou uma alteração significativa nos resultados foi a geomorfologia, isso se deve ao fato de que uma das classes possuía uma extensão expressiva na área que foi retirada, logo, com a redução de sua área total, a relação entre escoamentos e área total fez com que essa classe resultasse em um valor informativo mais elevado. Isso também é justificado pelo fato desta temática possuir um número reduzido de classes, sendo que os escoamentos se dão em apenas três delas (o que será melhor discutido posteriormente). Por fim, ainda neste sentido é válido salientar que a redução da área também favoreceu os processamentos devido a diminuição do número de píxeis, o que colaborou com os ajustes das tabelas de sucesso e predição, que em alguns casos foram bastante extensas.

A partir das imagens ALOS PALSAR puderam ser gerados os mapas de hipsometria, declividade, orientação de vertente, plano e perfil de curvatura, direção de fluxo (D-Infinity e MFD) e TWI. Além desses, foram utilizados mapas de litologia, solo e geomorfologia (IBGE e CPRM), originalmente no formato vetorial. O número elevado de temáticas (e variações delas) veio a permitir o maior número de testes para o modelo de suscetibilidade final, principalmente se tratando da direção de fluxo, em que três métodos diferentes foram testados. Por fim, optou-se por utilizar a direção de fluxo a partir do processamento D-Infinity ( $D^\infty$ ), mas de qualquer maneira, o processamento da direção de fluxo MFD (*Multiple Flow Direction*) se fez presente, pois é utilizado na geração do mapa de TWI, juntamente com o mapa de declividade.

Dito isto, apresentam-se os resultados das temáticas analisadas e sua relação com os escoamentos, aqui apresentados em área relacionados ao número de *pixel*, do grupo denominado “estimação”, além do percentual de área total e o percentual de área com movimento de massa do tipo escoamento em cada classe temática. Os resultados são:

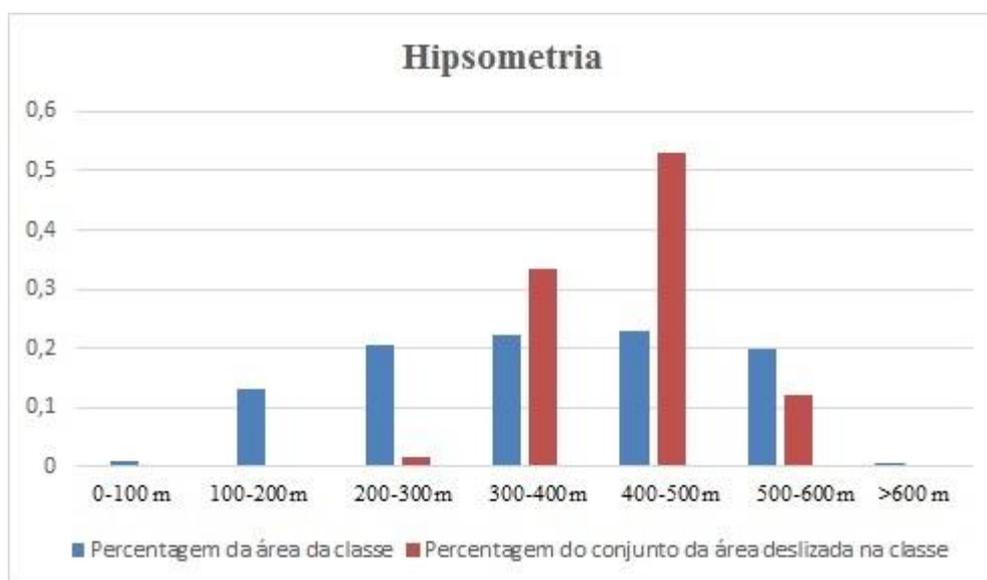
#### a) Hipsometria

Com relação à hipsometria, o mapa foi dividido em sete classes, sendo elas de 0 a 100 m (identificado no gráfico pelo número 1), 100 a 200 (2), 200 a 300 (3), 300 a 400 (4), 400 a 500

(5), 500 a 600 (6) e maior que 600 (7). O resultado da relação do percentual da área de cada classe e do percentual dos escorregamentos em cada classe pode ser conferido na Figura 60.

Pode-se perceber que as classes 3, 4, 5 e 6, representam boa parte da área, isto é, são áreas acima de 200 m, seguidas das classes 2, 1 e 7, respectivamente, sendo as duas últimas pouco representativas. Porém, no que tange o volume de áreas escorregadas, a classe 5 (de 400 a 500 metros de altitude) possui grande destaque, pois apresenta mais que o dobro das demais. A classe 4 também merece destaque, apresentando, como a classe 5, um percentual de área escorregada maior do que o seu próprio percentual de área total.

Figura 60 - Percentual das classes hipsométricas na área de estudo e sua relação com as percentagens de área escorregada.



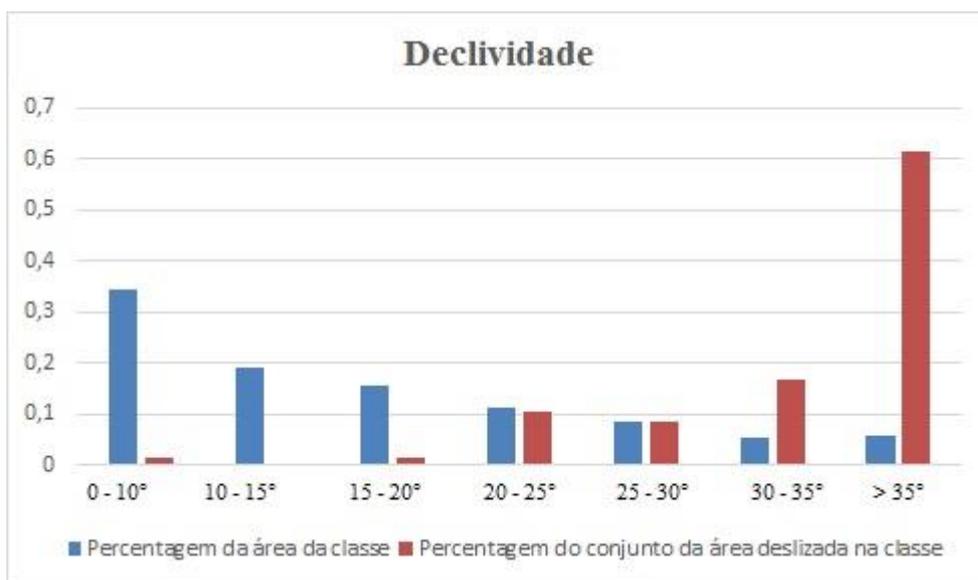
Fonte: Autor.

## b) Declividade

A declividade apresentada em graus ( $^{\circ}$ ), está em concordância com boa parte dos trabalhos que vem utilizando da técnica do Valor Informativo. Desta forma, o mapa de declividade foi elaborado separando a temática em 7 classes: de 0 a  $10^{\circ}$  (1), 10 a  $15^{\circ}$  (2), 15 –  $20^{\circ}$  (3), 20 a  $25^{\circ}$  (4), 25 a  $30^{\circ}$  (5), 30 a  $35^{\circ}$  (6) e maior do que  $35^{\circ}$  (7). O resultado da relação do percentual da área da classe e do percentual de escorregamentos na classe de declividade pode ser conferido na Figura 61.

Em relação à área, predominam as classes de declividade 1 (0 a 10°); 2 (10 a 15) e 3 (15 a 20). As classes que ocupam a menor área são a 6 (30 a 35) e 7 (maior que 35°). Vale salientar que nas áreas de classe de declividade 6 e 7 é onde ocorrem a maior percentagem de área escorregada, sendo que a classe 7 é a mais expressiva.

Figura 61 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de declividade.

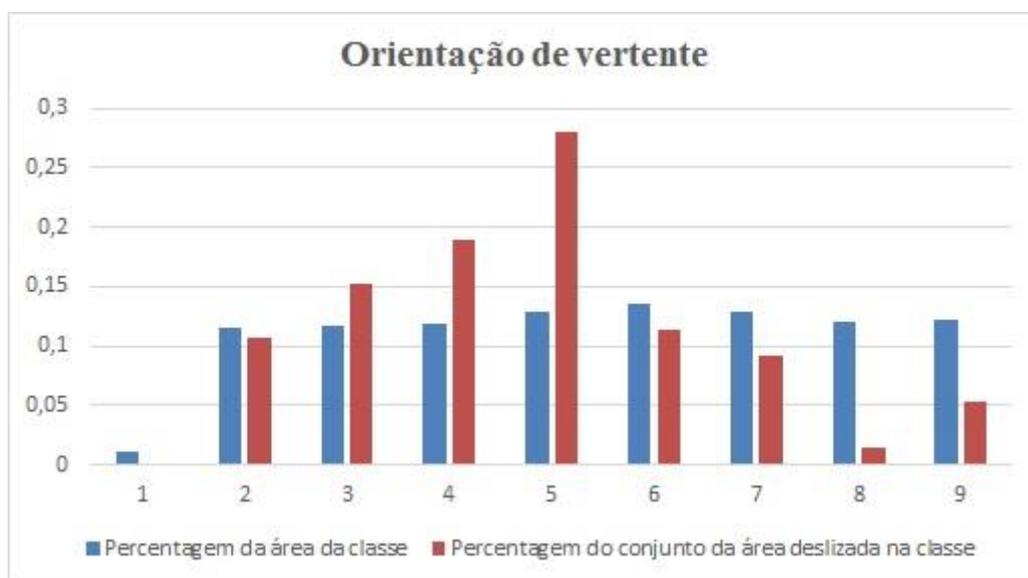


Fonte: Autor.

### c) Orientação de vertente

Em seu processamento na presente pesquisa, há uma divisão em nove classes, sendo elas: plano (áreas planas) (1), norte (2), nordeste (3), leste (4), sudeste (5), sul (6), sudoeste (7), oeste (8) e noroeste (9). Cabe salientar que testes também foram realizados apenas com pontos cardeais e posteriormente também com pontos subcolaterais, porém, julgou-se melhor a utilização final dos pontos colaterais, como apresentado. O resultado da relação do percentual da área da classe e do percentual de escorregamentos na classe pode ser conferido na Figura 62.

Figura 62 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de orientação de vertente.



Fonte: Autor.

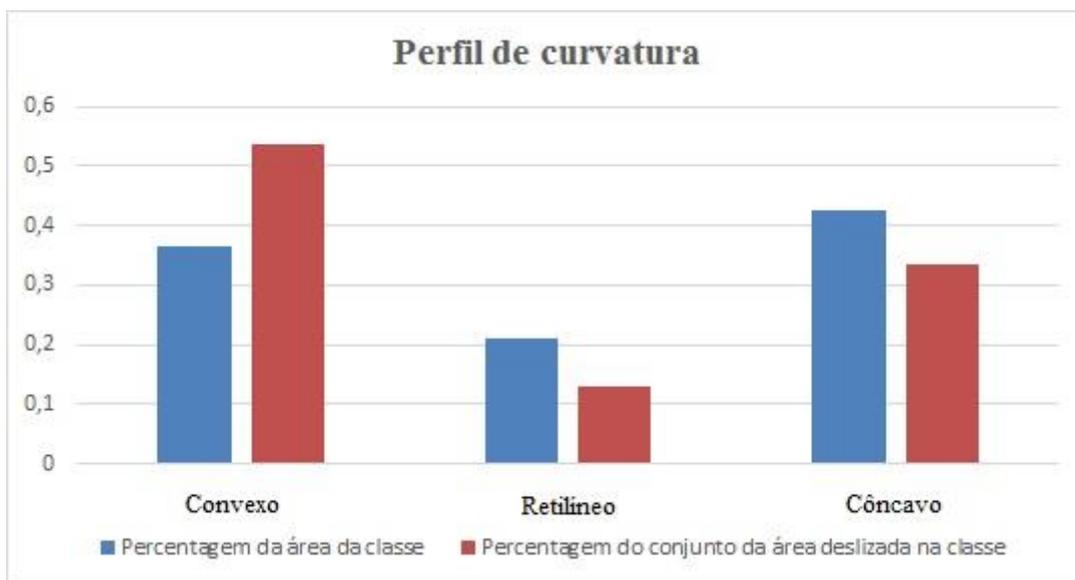
É interessante analisar as particularidades das temáticas, e nesta, especificamente, percebe-se inicialmente uma distribuição, tanto do percentual deslizado, como da área total, mais proporcional do que as temáticas anteriormente analisadas. Inicialmente, é visível que a classe que o processamento classificou como “*flat*” (plana), é a com menor percentual de área total, o que é facilmente compreensível, e também o fato de que esta classificação não apresentou nenhum *pixel* de escorregamento, o que é perfeitamente compatível com o que se espera de tal classe, visto que na prática isso significa que nenhum escorregamento aconteceu em áreas planas.

Há uma proporcionalidade entre todas as classes de orientação para toda a área, porém vale ressaltar que há um percentual de escorregamentos elevado nas classes 5 (sudeste), 4 (leste) e 3 (nordeste), sendo também pertinente observar que foram as únicas que apresentaram um percentual de área deslizada maior do que seu percentual de área total. Por fim, também é interessante observar um número um pouco mais modesto de áreas deslizadas na orientação oeste (8), que posteriormente significará um menor peso na técnica do Valor Informativo.

#### d) Curvatura em perfil

O perfil de curvatura das vertentes foi classificado em três tipos: convexo (1), retilíneo (2) e côncavo (3). O resultado da relação do percentual da área da classe e do percentual de escorregamentos na classe pode ser conferido na Figura 63

Figura 63 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de perfil de curvatura.



Fonte: Autor.

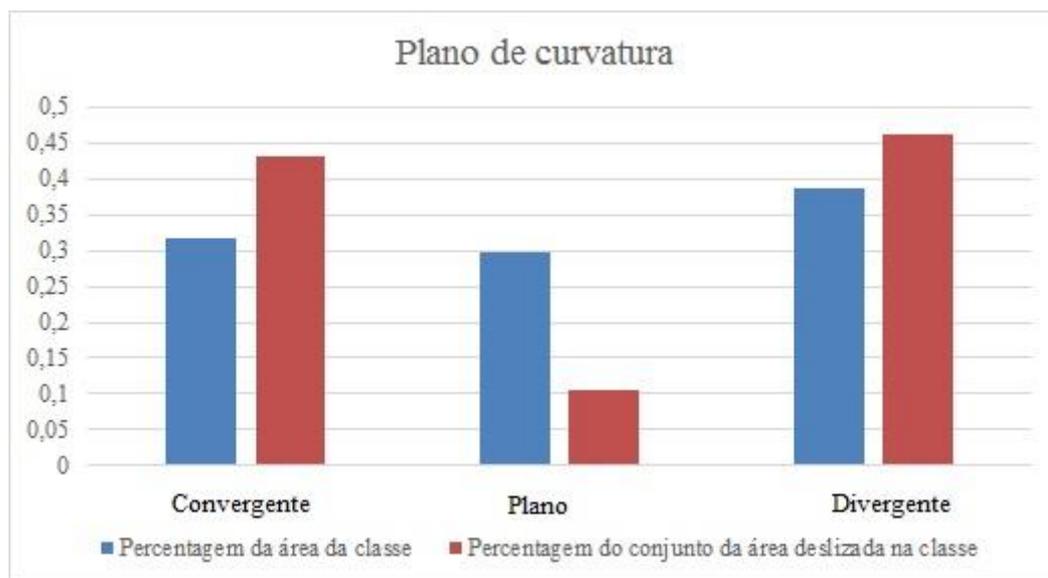
A área ocupada por vertentes de perfil convexo e côncavo são bastante próximas, com um leve predomínio a última. O percentual de áreas escorregadas é maior nas vertentes de perfil convexo. Além disso, como esperado, a classe retilínea (2), foi a que apresentou os menores percentuais, tanto de área total quanto de área deslizada.

#### e) Curvatura em Plano

O plano de curvatura das vertentes também foi classificado em três tipos: convergente (1), plano (2) e divergente (3). A relação dos parâmetros ocorreu, também, de forma bastante semelhante à classificação do perfil de curvatura, e o resultado da relação do percentual da área da classe e do percentual de escorregamentos na classe pode ser conferido na Figura 64.

Em área total as vertentes com planos convergentes e divergentes são aproximadamente iguais, com o predomínio da última. Da mesma forma, a área dos escorregamentos são muito semelhantes nas duas, sendo um pouco superior nas divergentes.

Figura 64 - Relação do percentual da área total e área escorregada de cada classe de plano de curvatura.



Fonte: Autor.

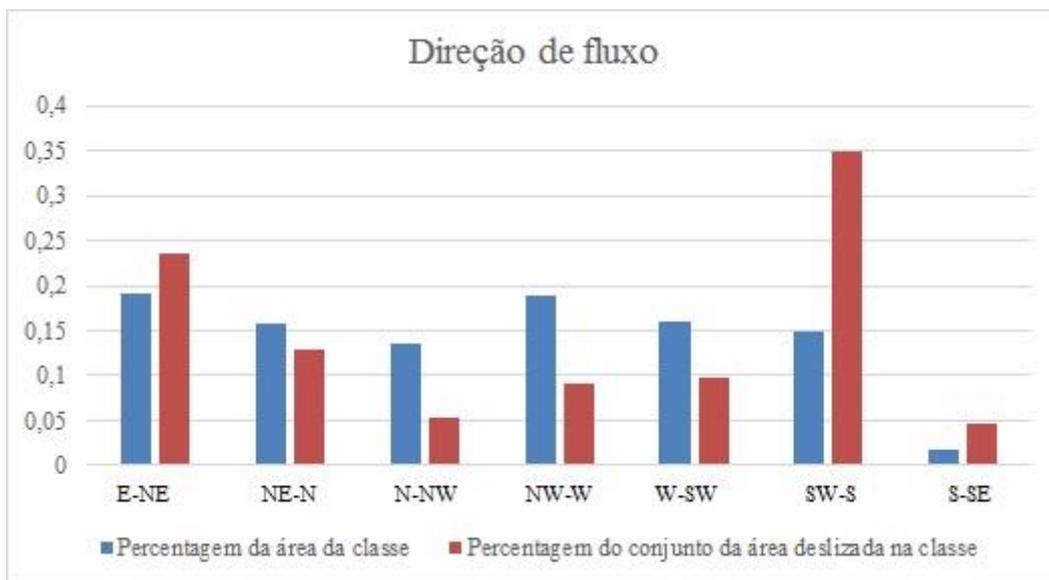
#### f) Direção de fluxo

Como já comentado, o processamento escolhido para a direção de fluxo nesta etapa do trabalho foi o  $D_{\infty}$  (D-Infinity). Este processamento apresenta como resultado dados contínuos, que podem ir de 0 a 8. No caso da presente pesquisa os resultados foram de 0 a 6,28. Desta maneira, optou-se por dividir os dados em sete classes, são elas: 0 a 1 (1), 1-2 (2), 2 a 3 (3), 3 a 4 (4), 4 a 5 (5), 5 a 6 (6) e maior do que 6 (7).

Para esclarecer o que seriam essas classes, pode-se dizer que expressam a transição entre diferentes direções, tais como: 0 a 1 (leste-nordeste), 1 a 2 (nordeste-norte), 2 a 3 (norte-noroeste), 3 a 4 (noroeste-oeste), 4 a 5 (oeste-sudoeste), 5 a 6 (sudoeste-sul) e maior do que 6 (sul-sudeste). Assim, pelo classificador  $D_{\infty}$ , não há vertentes na transição sudeste-leste (que seria representada pelos valores 7 a 8). O resultado da relação do percentual da área da classe e do percentual de escorregamentos na classe pode ser conferido na Figura 65.

Primeiramente há se destacar que a classe 7 apresenta percentuais baixos, tanto de área total quanto de área deslizada, pelo fato de esta ser a última classe da classificação, que foi até 6,28, ou seja, ela possui uma área naturalmente menor. Porém, percebe-se, proporcionalmente, que sua área deslizada é considerável, se comparada à área total.

Figura 65 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de direção de fluxo.



Fonte: Autor.

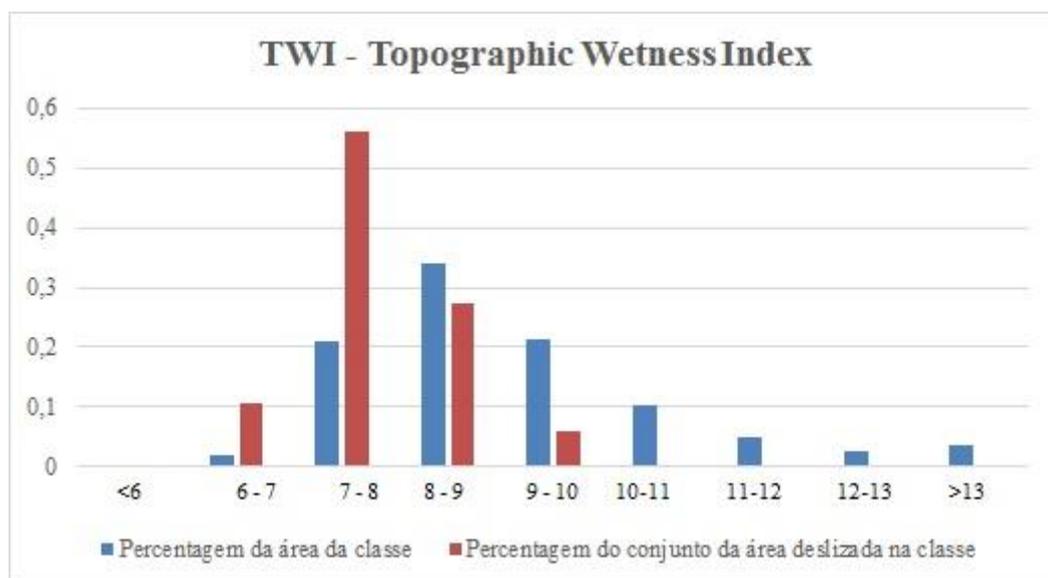
Em uma análise geral, há o destaque da classe 6, que representa uma variação das direções sul e sudeste, principalmente com relação ao percentual de área escorregada. Assim, posteriormente, é essa classe que receberá destaque na técnica do Valor Informativo.

É interessante também apontar que essa direção faz relação com os resultados de orientação de vertente, anteriormente apresentadas, visto que nesta o destaque foi para a orientação sudeste. Após esta classe, a 1 (leste-nordeste) foi a outra fração que apresentou um percentual de área escorregada maior do que o percentual de área total, o que também faz excelente relação com os resultados de orientação de vertente, visto que nessa classificação as vertentes de orientação tanto leste quanto nordeste também tiveram destaque. Em suma, as únicas duas classes que apresentaram percentuais de áreas deslizadas maiores do que seus percentuais de áreas totais na direção de fluxo, fizeram relação com as únicas três classes de orientação de vertente que possuíam esta característica.

### g) Topographic Wetness Index – TWI

O TWI (*Topographic Wetness Index*), ou na literatura brasileira traduzido, por vezes, apenas como Índice de Umidade, foi um dos dois atributos secundários testados na presente pesquisa. Com píxeis que variaram de 4,5 a 25,8, optou-se por representar essa temática com a divisão em 9 classes, são elas: menor do que 6 (1), 6 a 7 (2), 7 a 8 (3), 8 a 9 (4), 9 a 10 (5), 10 a 11 (6), 11 a 12 (7), 12 a 13 (8) e maior do que 13 (9). O resultado da relação do percentual da área de cada classe e do percentual de escorregamentos em cada classe pode ser conferido na Figura 66.

Figura 66 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de TWI.



Fonte: Autor.

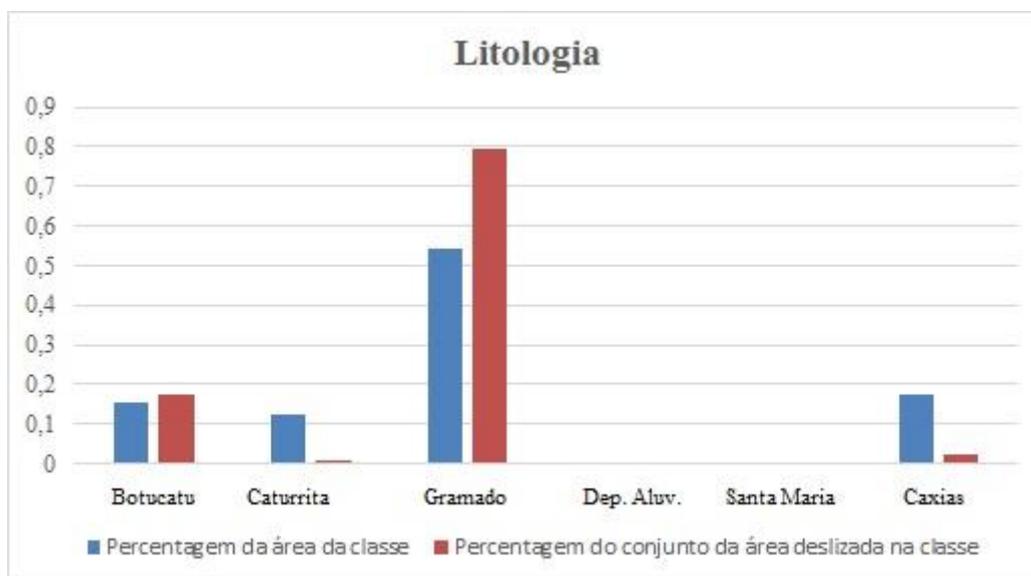
As classes com maiores índices de umidade em área são a 4, 3 e 5 (sendo as duas últimas iguais). Percebeu-se um bom destaque da classe 3, com um percentual de área deslizada bastante superior as 8 demais classes, sendo um valor mais de 2,5 vezes maior que o percentual de área total da própria classe. Depois dela, também há um destaque para a classe 2 (de 6 a 7), que apesar de um percentual de área total bastante modesto, apresentou um percentual de áreas deslizadas expressivo, sendo cerca de 5,5 vezes maior do que o percentual de área total da própria classe. Esses fatores, logicamente, serão devidamente representados na forma de Valor Informativo posteriormente. Apesar da classe 4 também apresentar áreas significativas, não

chegou a possuir um percentual de área deslizada superior ao percentual de área total, tal como as classes 3 e 2.

### h) Litologia

O mapa litológico possui particularidades, primeiramente por não ser processado a partir da mesma base (imagem ALOS PALSAR), e também por ser oriundo de um dado vetorial, que precisou passar por uma transformação para dado matricial, além de outros processamentos, antes de ser novamente classificado. As classes presentes dentro da delimitação do Rebordo do Planalto foram apresentadas da seguinte maneira: Botucatu (Arenito fino, Quartzo arenito) (1), Caturrita (Arenito, Pelito) (2), Gramado (Basalto, Latito) (3), Depósitos aluvionares (Areia, Areia arcoseana) (4), Santa Maria (Lamito) (5) e Caxias (Riodacito e Quartzo latito) (6). O resultado da relação do percentual da área da classe e do percentual de escorregamentos na classe pode ser conferido na Figura 67.

Figura 67 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de litologia.



Fonte: Autor.

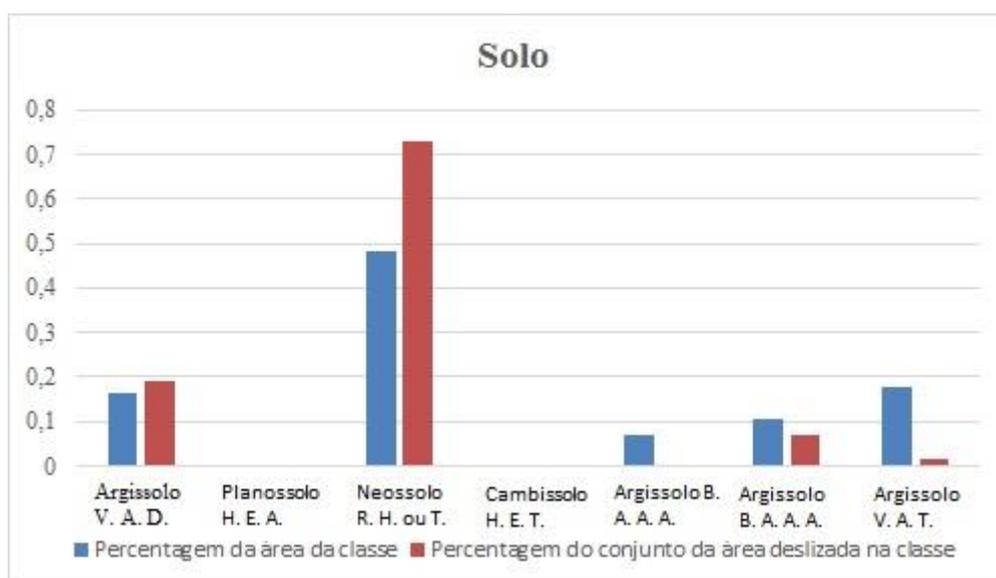
De maneira geral, a classe com maior destaque em área total e deslizada é a 3 (Gramado), inclusive tendo um percentual de área deslizada superior ao de área total. Da mesma forma, a classe 1 (Botucatu) também apresentou essa característica de ter um percentual de área

deslizada maior ao ser comparada com seu próprio percentual de área total, porém com volumes consideravelmente mais baixos. A partir de então, as classes 2 e 6 não tiveram essa característica, e as classes 4 e 5 nem mesmo são significativas para a área de estudo.

### i) Solo

Com relação ao tipo de solo, percebe-se a mesma particularidade do item anterior (litologia), visto que o trabalho original é realizado no formato vetorial, logo sofre algumas alterações visando a sua transformação para dado matricial (*raster*), o que impõe algumas alterações do dado original. Para a área de estudo, foram identificados sete tipos de solos, o que resultou em sete classes, são elas: Argissolo Vermelho-amarelo distrófico (1), Planossolo háplico eutrófico arenico (2), Neossolo Regolítico húmico ou típico (3), Cambissolo Háplico eutrófico típico (4), Argissolo Bruno acinzentado alítico abrupto (5), Argissolo Bruno acinzentado alítico abrupto (6) e Argissolo Vermelho alumínico típico (7). As diferenças entre as classes 5 e 6 se deram de acordo com a classe, resistência, material de origem e textura, conforme o dado original do IBGE. O resultado da relação do percentual da área da classe e do percentual de escorregamentos na classe pode ser conferido na Figura 68.

Figura 68 - Relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de solo,



Fonte: Autor.

Percebe-se que a classe de maior destaque é a 3 (Neossolo Regolítico húmico ou típico), com maior percentual tanto de área total quanto de área deslizada. Além dela, a classe 1 (Argissolo Vermelho-amarelo distrófico) também apresentou maior percentual de área deslizada se comparada ao seu próprio percentual de área total. De maneira geral, não observa-se um destaque expressivo nesta temática, embora a maior relação com os escorregamentos tenha sido apresentado pelos solos do tipo Neossolo Regolítico húmico ou típico (3), Argissolo Vermelho-amarelo distrófico (1) e Argissolo Bruno acinzentado alítico abrupto (6), nessa ordem, embora este último tenha um percentual de escorregamentos abaixo do percentual de área total.

#### **j) Geomorfologia**

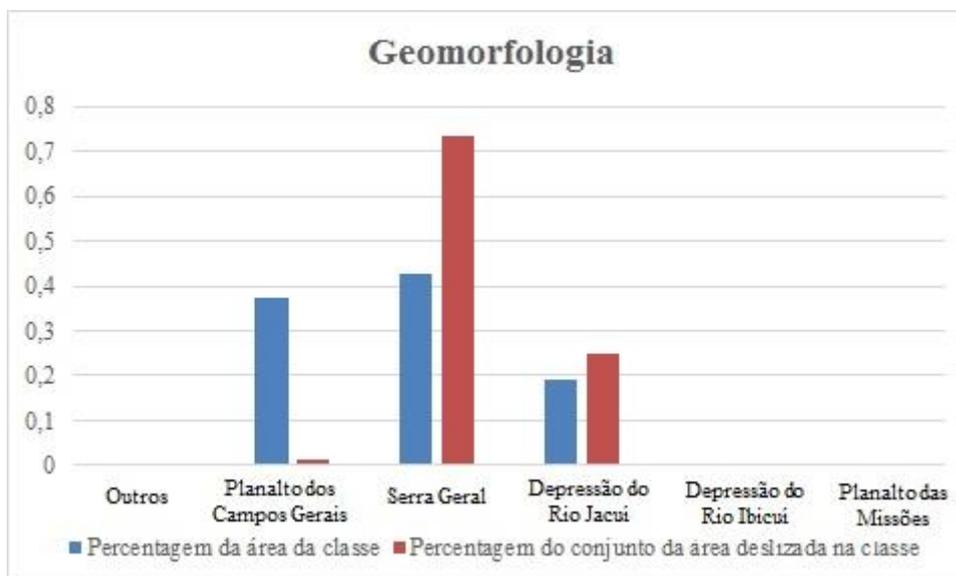
A geomorfologia segue os mesmos princípios das duas temáticas anteriormente apresentadas (litologia e solo) com relação a adaptação do tipo de dado para a posterior aplicação da técnica do Valor Informativo.

Assim, a temática foi dividida em seis classes, de acordo com o que foi apresentado dentro da área de estudo (Rebordo do Planalto), sendo elas: outros (1), Planalto dos Campos Gerais (2), Serra Geral (3), Depressão do Rio Jacuí (4), Depressão do rio Ibicuí (5) e Planalto das Missões (6).

Primeiramente é pertinente esclarecer que a classe “outros”, a primeira apresentada nesta temática, conforme os dados originais, se refere a corpos d’água e áreas urbanas. Adicionalmente a isso, pôde-se perceber também que esta classe não possui uma área total expressiva, e muito menos área deslizada, esta última que foi, inclusive, inexistente.

Com relação as demais classes, as informações conferiram com o que já era apresentado anteriormente na tese, ou seja, os escorregamentos se fizeram presentes em apesar três classes, sendo elas: Serra Geral (3), Depressão do rio Jacuí (4) e Planalto dos Campos Gerais (2). Depressão do Rio Ibicuí e Planalto das Missões, juntamente com a classe “outros”, já comentada, não apresentaram escorregamentos. Para melhor visualizar os resultados, tem-se a Figura 69.

Figura 69 - relação do percentual da área total e área deslizada de cada classe de geomorfologia.



Fonte: Autor.

Nota-se como as classes 5 e 6 nem mesmo foram representativas na temática, o que praticamente também acontece com a classe 1. No caso da classe 1, como já esclarecido, isso se deve pelas temáticas que essa classe representa. Já no caso das classes 5 e 6, isso se deve pelo fato de a temática ter sido recortada pela área de Rebordo do Planalto, o que, eventualmente, pode fazer com que algumas temáticas apareçam, mesmo que de maneira muito diminuta.

A análise efetivamente é realizada entre as classes 2, 3 e 4, como já comentado, e percebe-se que a classe 2 (Planalto dos Campos Gerais), apesar de apresentar um percentual de área total bastante expressivo na temática, possui um percentual deslizado pouco expressivo, o que conseqüentemente dará a ela um baixo Valor Informativo. A classe 3 (Serra Geral) é a que se destaca entre as demais por possuir os maiores valores tanto de percentual de área total, quanto de área deslizada. A classe 4 (Depressão do Rio Jacuí) também merece atenção, por possuir um percentual de área deslizada superior ao percentual total da classe.

Foram calculados os valores informativos para todas as variáveis. Ao final, em virtude do processamento D-Infinity ter sido escolhido para representar a direção de fluxo, não se inseriu a classificação D8 nas análises (e tabelas) posteriores, porém sua taxa de sucesso e predição também foram verificadas e ficaram abaixo das obtidas com a D-Infinity. Assim, de

acordo com a Tabela 1, podem ser verificados os valores informativos de todas as classes das 11 temáticas utilizadas.

Tabela 1 - Processo de atribuição do valor informativo para as classes das temáticas.

(continua)

Temática	Código	Classe	Área total da classe	Área escorregada na classe	Valor Informativo	Valor Informativo x 1000
<b>Hipsometria</b>	1	0 - 100	13.961.406	0	-5,000	-5000
	2	100 - 200	218.984.531	0	-5,000	-5000
	3	200 - 300	337.903.906	312,5	-2,599	-2599
	4	300 - 400	366.161.406	6.875	0,412	412
	5	400 - 500	380.878.438	10.937,5	0,837	837
	6	500 - 600	331.030.781	2.500	-0,499	-499
	7	> 600	9.076.719	0	-5,000	-5000
<b>Declividade</b>	1	0 - 10°	571.562.813	312,5	-3,125	-3125
	2	10 - 15°	316.871.563	0	-6,000	-6000
	3	15 - 20°	259.776.094	312,5	-2,336	-2336
	4	20 - 25°	184.667.031	2.187,5	-0,049	-49
	5	25 - 30°	141.665.625	1.718,75	-0,025	-25
	6	30 - 35°	91.040.625	3.437,5	1,110	1110
	7	> 35°	92.413.438	12.656,25	2,399	2399
<b>Orientação de vertente</b>	1	Plano	19.218.594	0	-4,000	-4000
	2	N	191.181.250	2.187,5	-0,084	-84
	3	NE	195.313.281	3.125	0,252	252
	4	E	198.091.094	3.906,25	0,461	461
	5	SE	212.917.344	5.781,25	0,781	781
	6	S	224.253.906	2.343,75	-0,174	-174
	7	SW	214.419.688	1.875	-0,352	-352
	8	W	200.800.781	312,5	-2,079	-2079
	9	NW	201.801.250	1.093,75	-0,831	-831
<b>Perfil de curvatura</b>	1	Convexo	603.953.593,8	11.093,75	0,390	390
	2	Retilíneo	349.102.343,8	2.656,25	-0,492	-492
	3	Côncavo	704.941.250	6.875	-0,243	-243
<b>Plano de curvatura</b>	1	Convergente	525.851.562,5	8.906,25	0,309	309
	2	Plano	491.316.562,5	2.187,5	-1,027	-1027
	3	Divergente	640.829.062,5	9.531,25	0,179	179
<b>Direção de fluxo</b>	1	Leste-Nordeste	311.119.844	4.843,75	0,211	211
	2	Nordesre-Norte	257.486.406	2.656,25	-0,203	-203
	3	Norte-Noroeste	222.887.344	1.093,75	-0,944	-944
	4	Noroeste-Oeste	310.536.250	1.875	-0,736	-736
	5	Oeste-Sudoeste	262.428.125	2.031,25	-0,487	-487

Temática	Código	Classe	Área total da classe	Área escorregada na classe	Valor Informativo	Valor Informativo x 1000
	6	Sudoeste-Sul	243.186.094	7.187,5	0,854	854
	7	Sul-Sudeste	28.372.969	937,5	0,966	966
<b>TWI</b>	1	< 6	442.031	0	-2,500	-2500
	2	6 a 7	33.733.906	2.187,5	1,651	1651
	3	7 a 8	350.488.281	11.562,5	0,975	975
	4	8 a 9	561.422.031	5.625	-0,216	-216
	5	9 a 10	353.693.438	1.250	-1,258	-1258
	6	10 a 11	170.835.000	0	-2,500	-2500
	7	11 a 12	83.036.094	0	-2,500	-2500
	8	12 a 13	42.842.031	0	-2,500	-2500
	9	> 13	61.504.375	0	-2,500	-2500
<b>Litologia</b>	1	Botucatu	257.136.875	3.593,75	0,116	116
	2	Caturrita	201.607.969	156,25	-2,776	-2776
	3	Gramado	901.011.094	16.406,25	0,381	381
	4	Depósitos aluvionares	8.837.031	0	-5,000	-5000
	5	Santa Maria	2.452.031	0	-5,000	-5000
	6	Caxias	286.952.188	468,75	-2,030	-2030
<b>Solo</b>	1	Argissolo Vermelho-amarelo distrófico	269.459.219	3.906,25	0,152	152
	2	Planossolo háplico eutrófico arenico	4.361.094	0	-5,000	-5000
	3	Neossolo Regolítico húmico ou típico	796.927.344	15.000	0,413	413
	4	Cambissolo Háplico eutrófico típico	124.531	0	-5,000	-5000
	5	Argissolo Bruno acinzentado alítico abrupto	117.313.281	0	-5,000	-5000
	6	Argissolo Bruno acinzentado alítico abrupto	173.473.750	1.406,25	-0,429	-429
	7	Argissolo Vermelho alumínico típico	294.992.031	312,5	-2,464	-2464
<b>Geomorfologia</b>	1	Outros	6.613.438	0	-6,000	-6000
	2	Planalto dos Campos Gerais	616.860.625	312,5	-3,201	-3201
	3	Serra Geral	705.099.063	15.156,25	0,547	547

(conclusão)

Temática	Código	Classe	Área total da classe	Área escorregada na classe	Valor Informativo	Valor Informativo x 1000
	4	Depressão do Rio Jacuí	318.011.563	5.156,25	0,265	265
	5	Depressão do Rio Ibicuí	1.973.594	0	-6,000	-6000
	6	Planalto das Missões	9.438.906	0	-6,000	-6000

Fonte: Autor.

Na fórmula do Valor Informativo, quando o  $li$  (resultado da fórmula do Valor Informativo) é negativo, considera-se que a classe não é determinante para o movimento de massa em questão. Os valores positivos, ao contrário, apresentam relação, tanto mais acentuada quanto maior for o escore. Assim, não só o valor individual da classe é pertinente, mas também a relação dos valores com as demais classes da variável. Também é pertinente destacar que os valores informativos foram multiplicados por 1000, afim de melhorar os processamentos em SIG relacionados à álgebra de mapas.

Com essas informações foi possível calcular as taxas de sucesso e predição de cada temática separadamente, dando uma ideia de quais informações trariam uma melhor resposta quanto a suscetibilidade a escorregamentos no modelo final. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Taxas de sucesso e predição das temáticas analisadas.

Temáticas	Taxa de sucesso	Taxa de Predição
Declividade	0,91	0,9
Geomorfologia	0,87	0,82
TWI	0,78	0,78
Hipsometria	0,75	0,73
D-Infinity	0,67	0,65
Orientação	0,67	0,63
Solo	0,66	0,62
Litologia	0,65	0,6
Plano de curvatura	0,61	0,58
Perfil de curvatura	0,59	0,56

Fonte: Autor.

Como já comentado, a taxa de sucesso é uma análise que leva em consideração o grupo 1 de escorregamentos, os mesmos utilizados para a geração do modelo, ou seja, o de estimação.

Já a taxa de predição, utiliza como parâmetro o grupo 2, ou seja, grupo de validação, que não foi utilizado para gerar os valores informativos. Desta maneira é bastante esperado que as taxas de sucesso (analisadas para cada temática ou agrupadas) sejam maiores do que as taxas de predição. Os resultados comprovam esta afirmação, visto que todas as taxas de sucesso são maiores que as taxas de predição, com exceção do TWI, que apresentou o mesmo valor para ambos.

Para gerar o(s) modelo(s) final(ais) de suscetibilidade a escorregamentos, comumente são escolhidas as temáticas com resultados mais altos, tanto de taxa de sucesso, quanto predição, salvo alguns casos em que o pesquisador tenha algum motivo específico para manter uma temática, mesmo que ela tenha apresentado um valor não tão alto em tais taxas. Levando isso em consideração, optou-se primeiramente pelas três temáticas que apresentaram melhores taxas, sendo em ordem: declividade, Geomorfologia e TWI. O resultado desse somatório pode ser observado na Figura 70, e sua tabulação para análise de taxa de sucesso e curva AAC gerou cerca de 140 linhas, resultando em uma taxa de sucesso de 93% e de predição de 90%, como pode ser verificado na Figura 71. Percebe-se que após o somatório das temáticas, os píxeis variaram de -14500 (áreas menos suscetíveis), até 4597 (áreas mais suscetíveis).

A partir de então, optou-se por testar as temáticas declividade, TWI e hipsometria, e essa opção se deu na intenção de testar a uniformidade das bases de dados e a possibilidade de observar o comportamento de um modelo sem um dado de base vetorial com escala de 1:250.000. Substituindo uma temática de melhor taxa de sucesso e predição (de 87 e 82% para 75 e 73%), porém havendo a possibilidade de estar prejudicando o resultado devido às suas particularidades, o teste com o somatório de declividade, TWI e hipsometria foi intitulado de Modelo de suscetibilidade 2, e sua tabulação para análise de taxa de sucesso e curva AAC gerou cerca de 175 linhas, sendo a taxa de sucesso e predição de 93 e 91%, respectivamente. O resultado do processamento pode ser verificado na Figura 78. No modelo de suscetibilidade 2, após o somatório das três temáticas, os valores do píxeis (que no caso correspondem ao somatório dos Vis), se encontraram em uma faixa de -13500 até 4887. Assim, percebe-se que a faixa de valores de VI foi bastante semelhante entre os dois primeiros mapas, e isso se deve ao fato de ambos somarem três temáticas, sendo duas delas exatamente as mesmas (declividade e TWI). Desta forma, o segundo modelo não apresentou valores tão negativos se comparado ao primeiro (muito provavelmente influenciado por valores bastante negativos de algumas classes de geomorfologia, no modelo 1), e por outro lado apresentou valores positivos mais elevados, mesmo que com uma diferença não tão expressiva (de 4597 para 4887). As curvas de AAC do modelo de suscetibilidade 2 podem ser observadas na Figura 72.

Figura 70 - Modelo de suscetibilidade 1- Declividade, Geomorfologia e TWI.

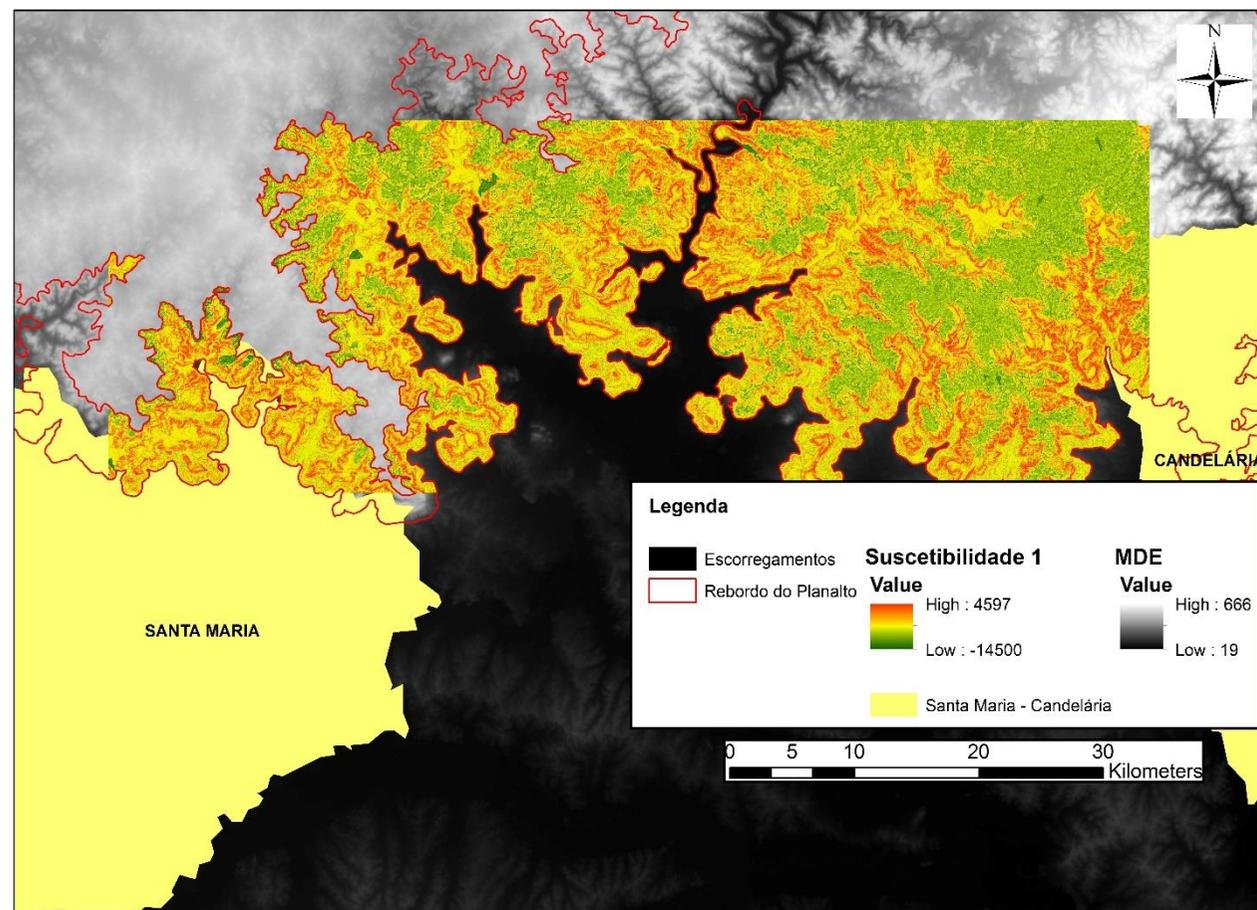
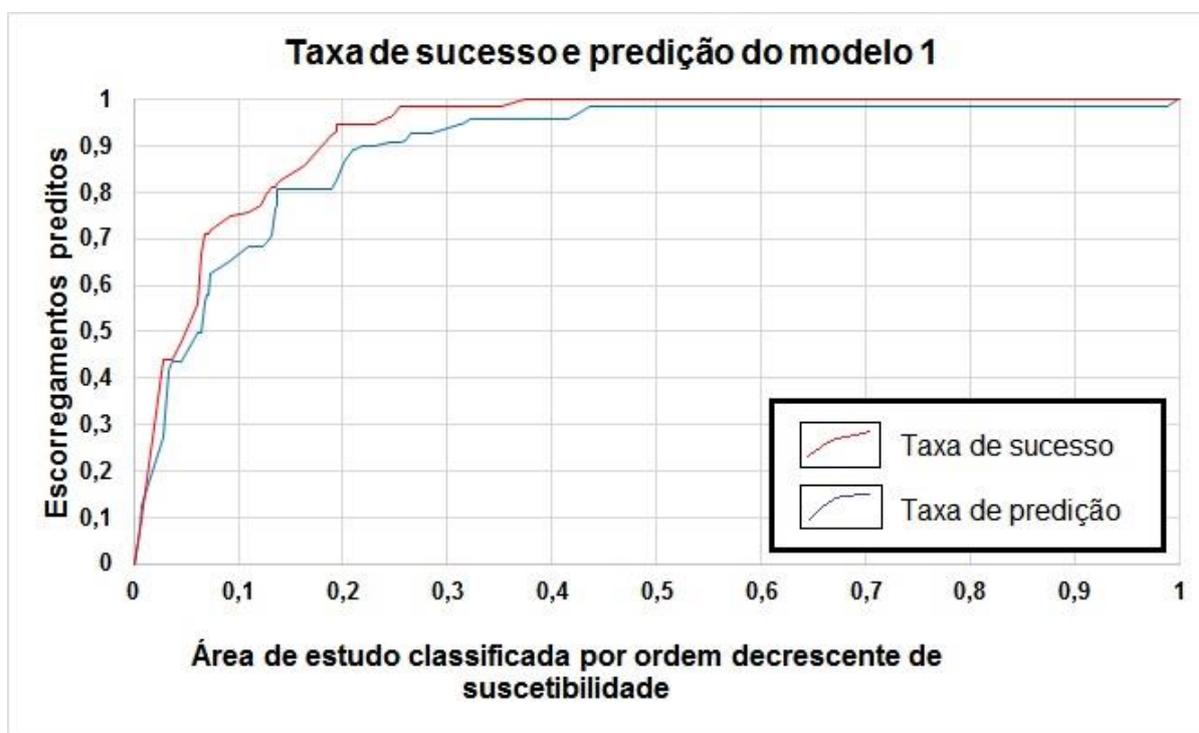


Figura 71 - Curva de sucesso do modelo 1: AAC - Área Abaixo da Curva.



Fonte: Autor.

A partir de então iniciou-se um terceiro teste, intitulado modelo de suscetibilidade 3, em que optou-se pelo somatório das seguintes temáticas: declividade, TWI, hipsometria, D-Infinity e orientação de vertente. Desta maneira, esse modelo apresenta todas as temáticas apresentadas no modelo de suscetibilidade 2, sendo adicionadas as temáticas de direção de fluxo (D-Infinity ou  $D_{\infty}$ ) e as orientações das vertentes, totalizando assim cinco temáticas. O processamento desta modelo apresentou uma faixa de píxeis entre -18444 e 6634, sendo um intervalo consideravelmente maior que os dois primeiros devido ao maior número de temáticas e consequente maior números de classes e maior variabilidade de valor de VI. O resultado desse processamento pode ser observado na Figura 73. Na análise da taxa de sucesso e curva de AAC, com mais de 4300 linhas, obteve-se um resultado de 94% de taxa de sucesso e 92% de previsão, conforme a Figura 74 e 75.

Figura 72 - Modelo de suscetibilidade 2 - Declividade, TWI e hipsometria.

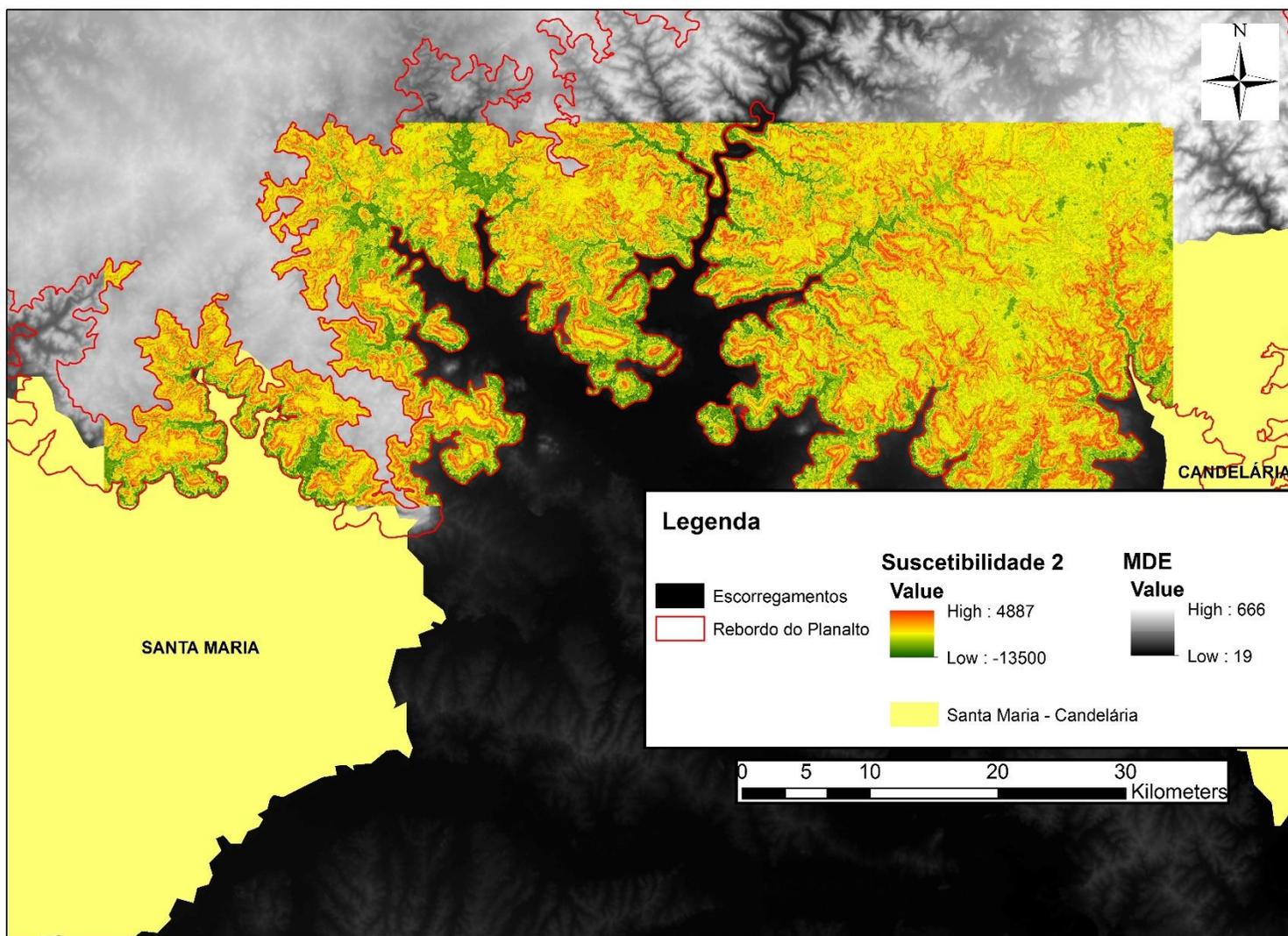
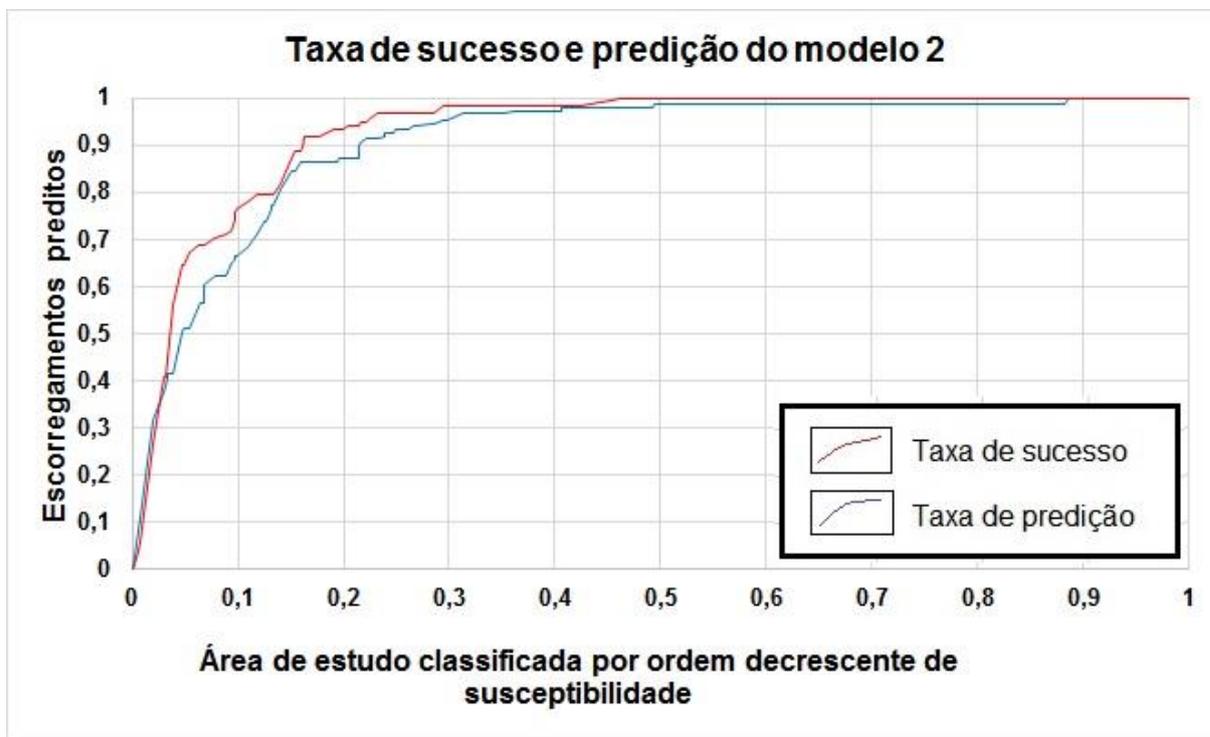


Figura 73 - Curva de sucesso do modelo 2: AAC - Área Abaixo da Curva.



Fonte: Autor.

Devido ao fato de haver uma melhora nas taxas de sucesso e predição ao aumentar o número de temáticas, optou-se por testar um quarto e último modelo (modelo de susceptibilidade 4), em que fossem somadas 7 temáticas, estando presente todas as temáticas dos três modelos anteriores, mais a temática de solos. Sendo assim, este modelo é o somatório das seguintes temáticas: declividade, geomorfologia, TWI, hipsometria, direção de fluxo, orientação de vertente e solo.

Neste caso cinco temáticas foram geradas a partir de uma mesma base (imagem ALOS PALSAR), sendo elas declividade, TWI, hipsometria, direção de fluxo e orientação de vertente, e duas delas de outras fontes, ambas no formato base vetorial, sendo elas geomorfologia (CPRM) e solo (IBGE), esta última ainda não utilizada nos modelos até então.

Figura 74 - Modelo de suscetibilidade 3 - Declividade, TWI, hipsometria, Direção de fluxo e orientação de vertente.

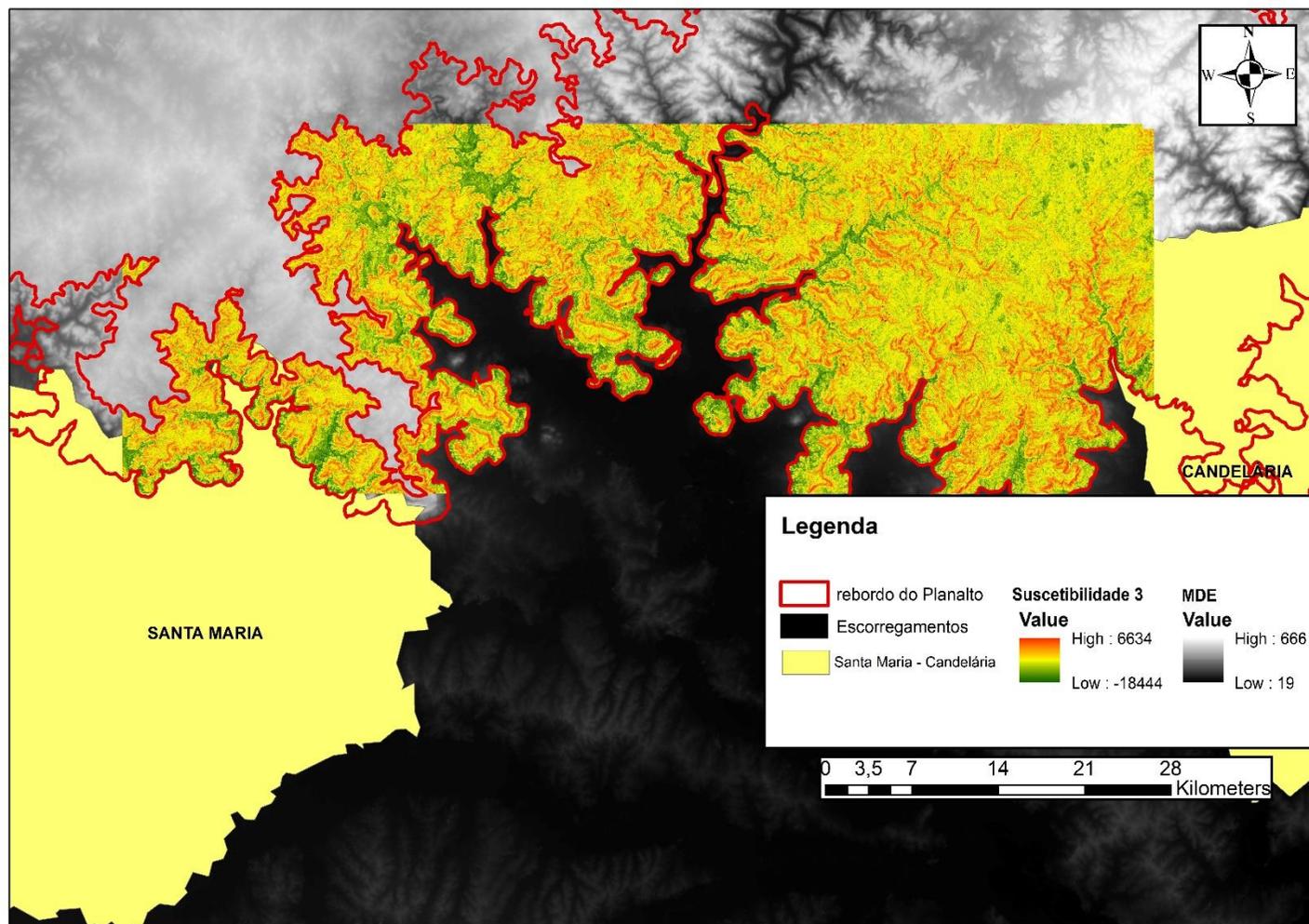
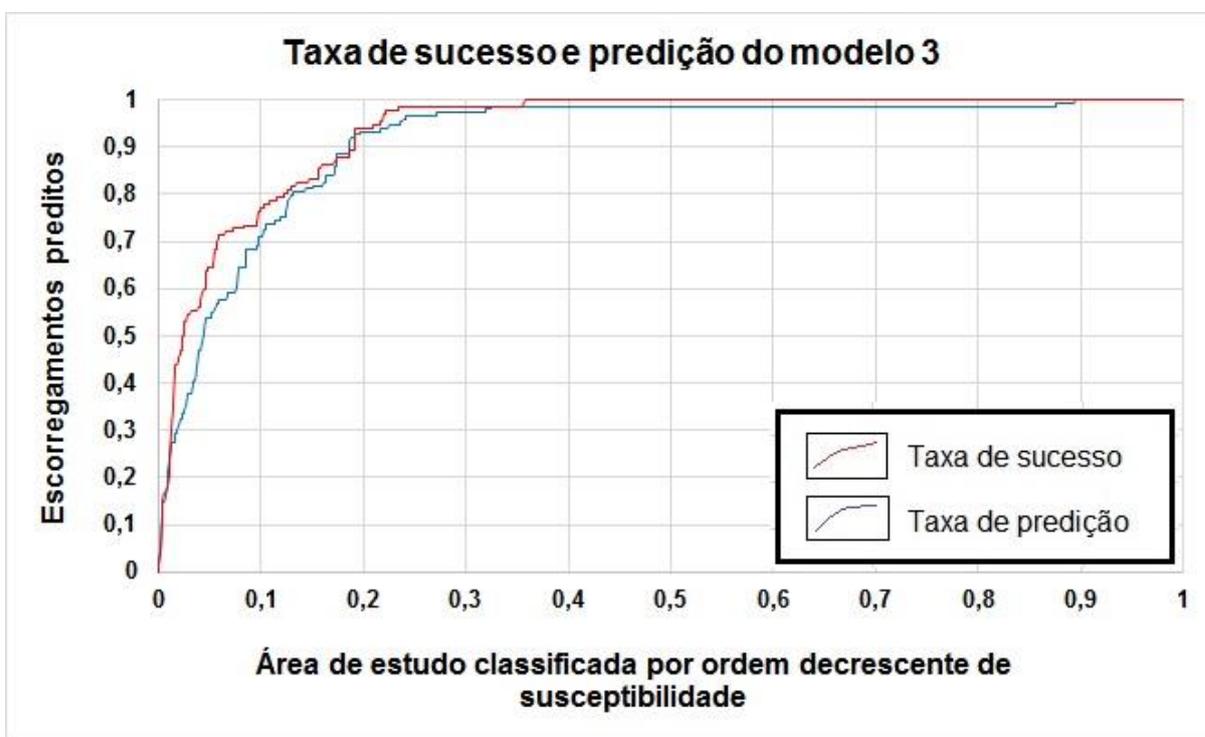


Figura 75 - Curva de sucesso do modelo 3: AAC - Área Abaixo da Curva.



Fonte: Autor.

O resultado do processamento do modelo de suscetibilidade 4 pode ser observado na Figura 76, com uma faixa de variação de *pixel* que foi de -27523 até 7594, a com maior amplitude até então e também com maiores valores tanto negativos quanto positivos de *pixel* (VI), o que é compreensível devido ao maior número de temáticas, classes e VIs. O resultado da curva de AAC gerou cerca de 18850 linhas e pode ser observado na Figura 77. Neste modelo foi presenciada uma taxa de sucesso de 95% e uma taxa de previsão de 92%, as melhores até então. Como percebido previamente, os resultados melhoraram com um maior número de temáticas, o que é bastante comum na técnica do Valor Informativo, apesar de não ser necessariamente assim em qualquer modelo. Para melhor comparar as curvas de sucesso das Áreas Abaixo da Curva (AAC), tem-se a Figura 78.

Figura 76 - Modelo de suscetibilidade 4 - Declividade, Geomorfologia, TWI, hipsometria, Direção de fluxo, orientação de vertente e solo.

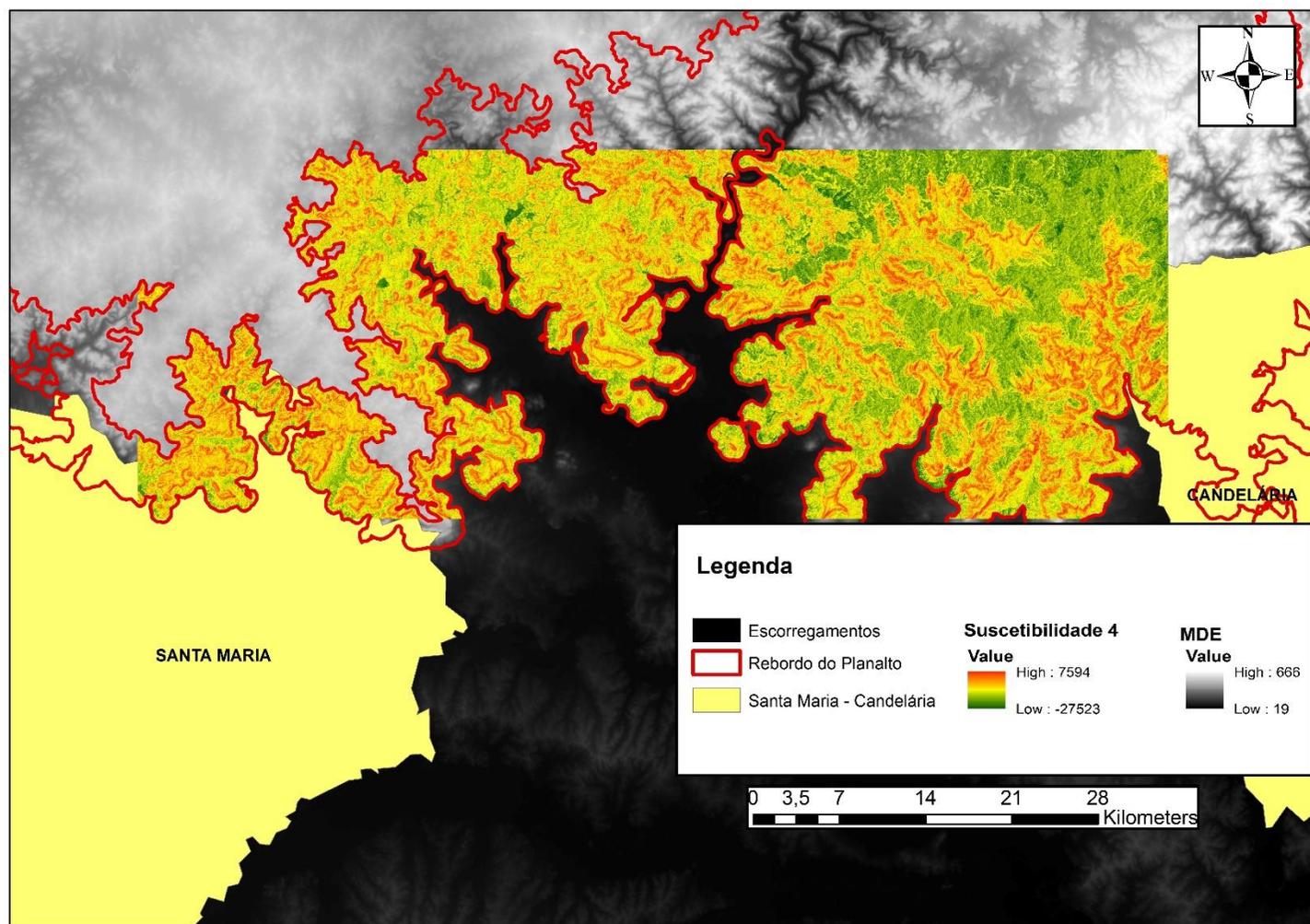
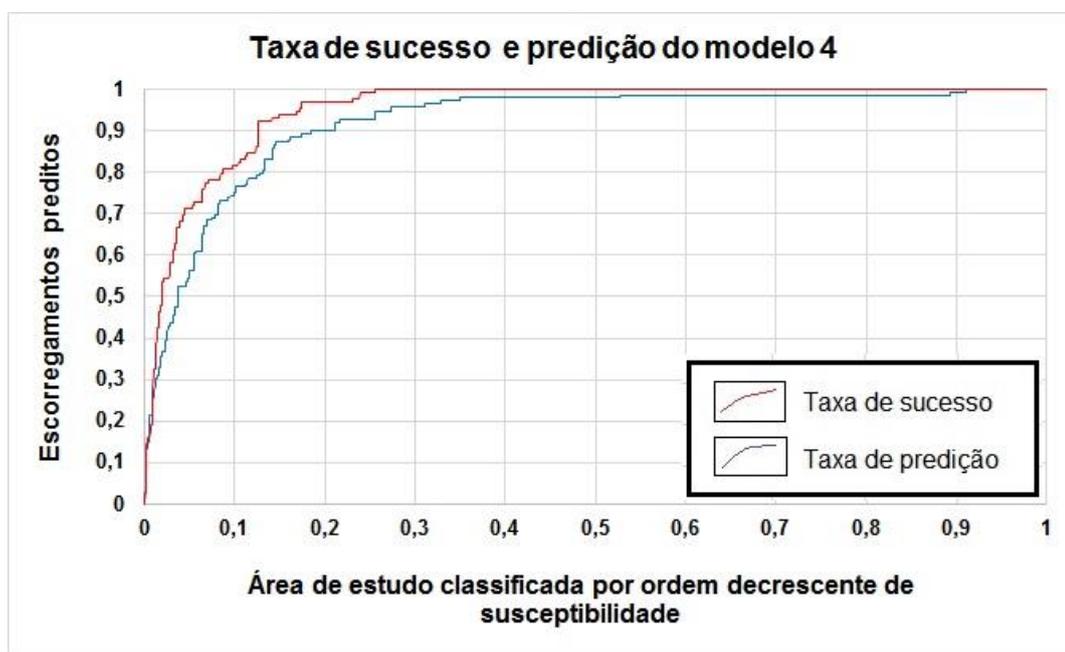
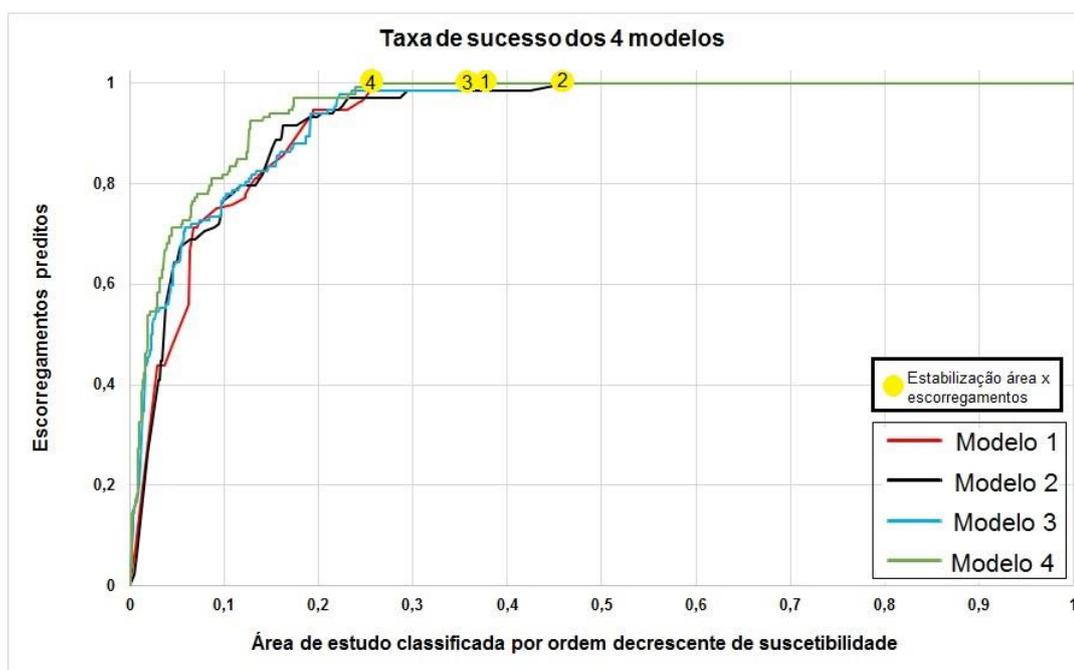


Figura 77 - Curva de sucesso do modelo 4: AAC - Área Abaixo da Curva.



Fonte: Autor.

Figura 78 - Curva de sucesso do modelo 1, 2, 3 e 4: AAC - Área Abaixo da Curva.



Fonte: Autor.

É interessante comparar as curvas de AAC e perceber algumas particularidades. Apesar da proximidade, é claramente notória a superioridade da curva de sucesso do modelo de suscetibilidade 4, sendo superado apenas em uma pequena porção pelo modelo 3, este que apresentou o segundo melhor resultado. Os modelos 1, 2 e 3, por diversas vezes se entrelaçam, mas também é notável uma melhora dos resultados no sentido crescente (do primeiro para terceiro). Para resumir os resultados de sucesso e predição dos quatro modelos, tem-se a Tabela 3.

Tabela 3 - Taxas de sucesso e predição dos modelos de suscetibilidade realizados.

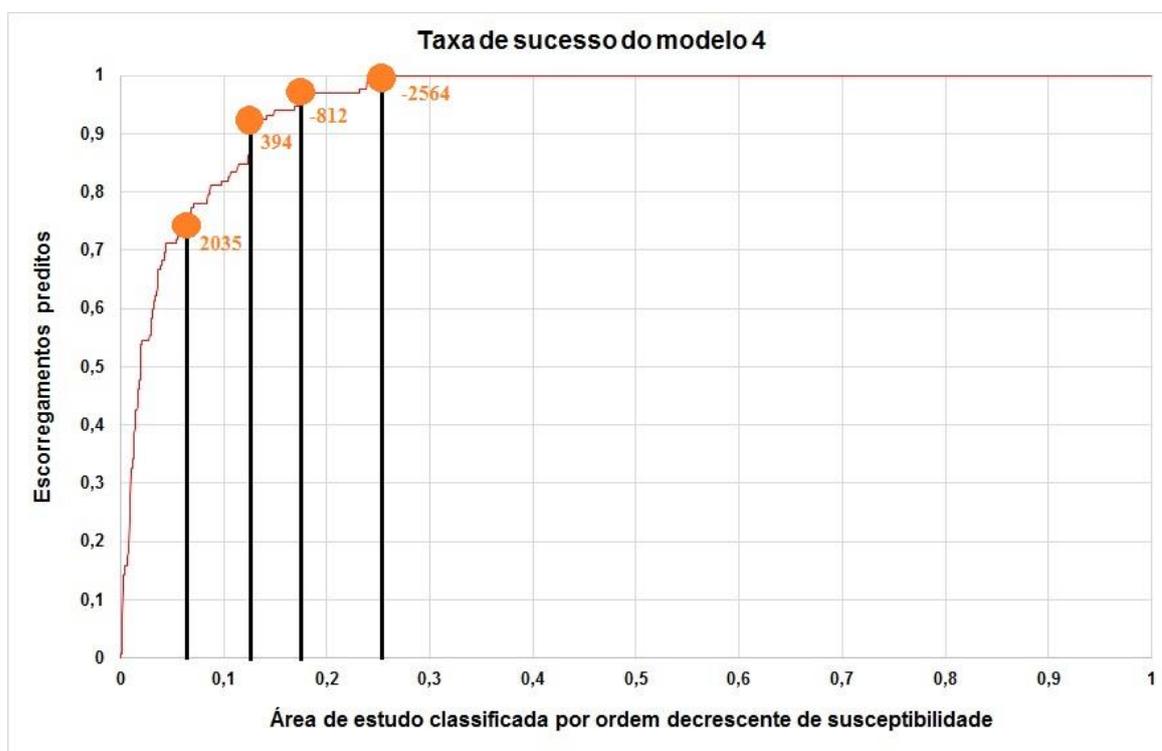
<b>Modelo</b>	<b>Variáveis utilizadas</b>	<b>Taxa de sucesso</b>	<b>Taxa de predição</b>
<b>1</b>	Declividade + TWI + Geomorfologia	93%	90%
<b>2</b>	Declividade + TWI + Hipsometria	93%	91%
<b>3</b>	Declividade + TWI + Hipsometria + Direção de Fluxo + Orientação de vertente	94%	92%
<b>4</b>	Declividade + TWI + Geomorfologia + Hipsometria + Direção de fluxo + Orientação de vertente + Solo	95%	92%

Fonte: Autor.

Diante do melhor resultado do último modelo (suscetibilidade 4), este foi selecionado para a classificação e mapa final de suscetibilidade a escorregamentos planares. Para tanto, é preciso definir as quebras da taxa de sucesso do referido modelo. Para tal, o gráfico da Figura 79 foi utilizado para definir as classes de suscetibilidade com base nas “quebras” da curva AAC.

Como comumente os mapas de suscetibilidade que se utilizam da estatística bivariada e do método do Valor Informativo definem cinco classes de suscetibilidade, foram identificadas as 4 quebras no curva de AAC, o que definiu 5 cinco classes de susceptibilidade. Após a observação das quebras, foi localizado o ponto exato de cada uma delas e a partir daí foi possível identificar o par de coordenadas (x, y) correspondente. Assim, pode-se definir os quatro valores informativos correspondentes as quatro quebras, sendo eles: -2584, -812, 394 e 2035. Como o eixo x corresponde a área de estudo classificada por ordem decrescente de suscetibilidade, vê-se a correspondência com o primeiro valor informativo (à extrema direita) como sendo o de menor valor (-2584), e assim sucessivamente até que o valor mais extremo à esquerda (áreas mais suscetíveis) apresente a quebra com maior valor informativo, que no caso foi 2035 (Figura 79).

Figura 79 - Quebras da curva de sucesso de AAC do modelo de suscetibilidade 4.



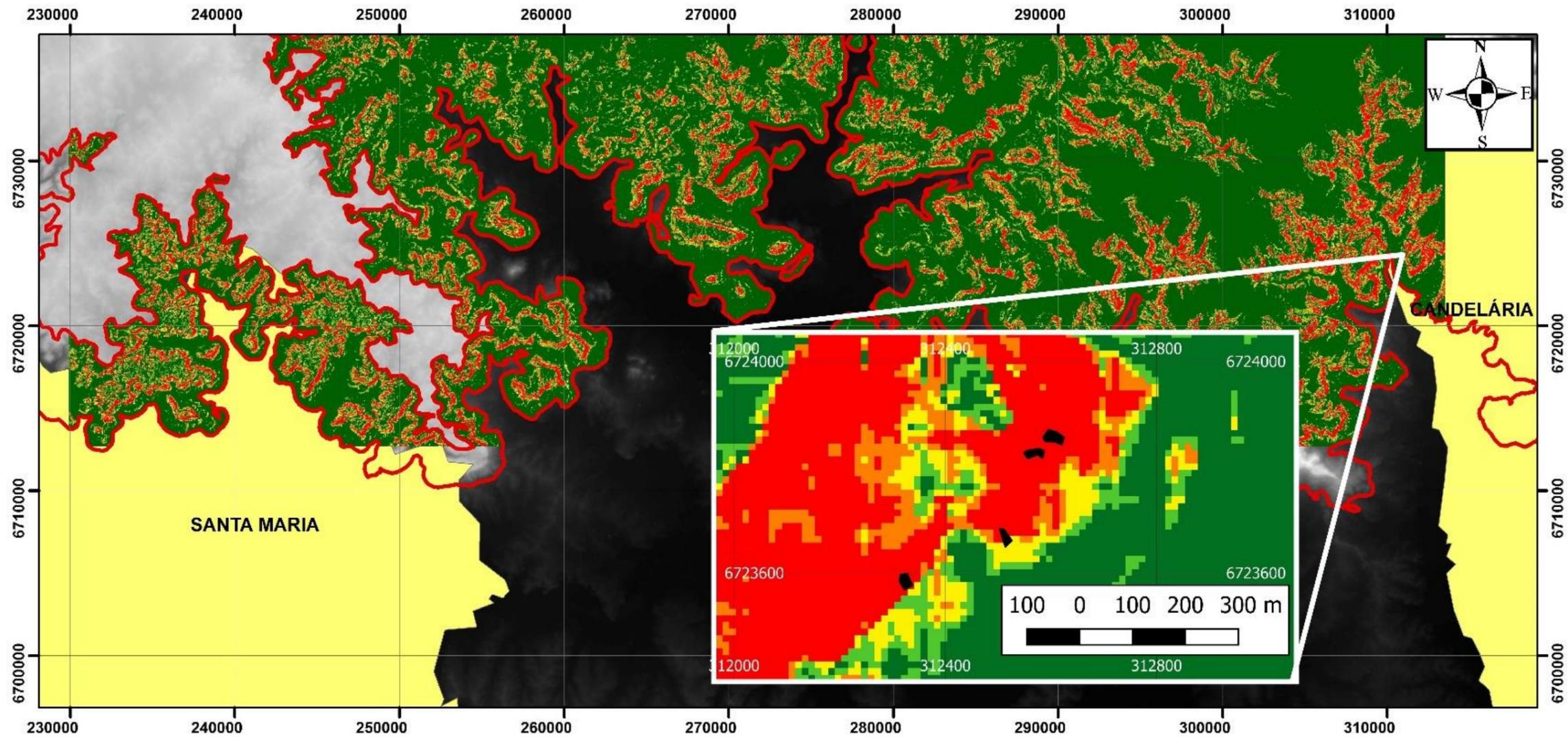
Fonte: Autor.

Com essas definições, pode ser elaborada a divisão das cinco classes de suscetibilidade, sendo elas: muito pouco suscetível, pouco suscetível, medianamente suscetível, suscetível e muito suscetível. Percebe-se uma estabilização dos valores (valor 1) do eixo y bastante cedo (entre 0,2 e 0,3 no eixo x), o que resultou em uma grande área classificada como muito pouco suscetível. As demais classes tiveram áreas semelhantes, sendo que a classe Pouco suscetível se destacou levemente em volume quando comparada as três classes restantes (Medianamente suscetível, Suscetível e Muito suscetível). O mapa classificado por ser observado na Figura 80.

Com o mapa final, percebe-se a grande predominância de áreas da classificação “muito pouco suscetível”, como já previsto pela curva de AAC do modelo, e, devido a escala do trabalho, com o estabelecimento de uma janela de observação, pode-se analisar melhor uma porção com quatro escorregamentos, em que três deles se estabeleceram totalmente na classe de maior suscetibilidade (classe I), e um deles apresenta parte na área de maior suscetibilidade (classe I) e outra na classe medianamente suscetível (classe III).

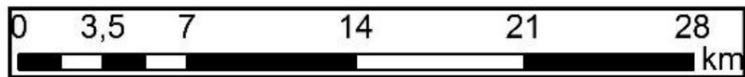


Figura 80 - Mapa final classificado de acordo com as Classes de suscetibilidade a escorregamentos planares com base nas quebras da curva de AAC.



**Mapa de suscetibilidade a escorregamentos no rebordo do Planalto entre Santa Maria e Candelária**

Sistema de coordenadas: UTM 22 S  
Datum: SIRGAS 2000



Data de elaboração: 03/07/2019  
Elaborado por: Guilherme Cardoso da Silva  
Lic. Bel. e Me. em Geografia e Esp. em Geomática

Este mapa foi elaborado a partir de imagens ALOS PALSAR disponibilizadas pela Alaska Satellite Facility, além do mapa Geomorfológico disponibilizado pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) e o mapa de solos disponibilizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

**Legenda**

Escorregamentos	<b>Classes de suscetibilidade</b>
Rebordo do Planalto	<b>Value</b>
Santa Maria - Candelária	Muito pouco suscetível
<b>MDE</b>	Pouco suscetível
<b>Value</b>	Medianamente suscetível
High : 666	Suscetível
Low : 19	Muito suscetível



Percebe-se que a classe de menor suscetibilidade (classe muito pouco suscetível) corresponde às áreas de menores e maiores hipsometrias, isso é explicado porque são nessas áreas que estão presentes as menores declividades. Essa classe representa a grande maioria da área de estudo (dentro dos limites do Rebordo do Planalto), sendo que as classes pouco suscetível e medianamente suscetível são porções intermediárias, entre esta grande porção de baixa suscetibilidade e as áreas mais suscetíveis (classes suscetível e muito suscetível), estas últimas fortemente relacionadas com áreas de hipsometrias médias-altas e com as declividades mais elevadas.

No mapa final de suscetibilidade a escorregamentos é possível elaborar a relação entre a percentagem total da classe e percentagem escorregada em cada classe, calculando assim a probabilidade espacial. Este procedimento pode ser realizado tanto com os escorregamentos de estimação (grupo 1), ou seja, o utilizado na taxa de sucesso, quanto com o de validação (grupo 2), utilizado na taxa de predição. Os resultados podem ser observados nas Tabelas 4 e 5.

Desta forma, percebeu-se que na análise do grupo de estimação (o mesmo utilizado para gerar o modelo), nenhuma área escorregada foi encontrada na classe muito pouco suscetível, o que resultou em uma probabilidade espacial "0". A partir de então, as áreas escorregadas foram aumentando progressivamente a medida que as classes foram consideradas mais suscetíveis, resultando em 625 m<sup>2</sup> na classe pouco suscetível, 1.250, na medianamente suscetível, 2.812,5 na suscetível e finalmente 15.937,5 na muito suscetível, esta última que seria a classe de maior suscetibilidade estabelecida para esta tese. Desta maneira, verifica-se que a classe de maior suscetibilidade representa 6,95% da área total e conseguiu prever 77,27% dos escorregamentos. No mesmo sentido, a classe anterior, suscetível, abrange 5,69% da área de estudo, e previu 13,64% dos escorregamentos. De tal maneira, é possível dizer que as duas classes mais suscetíveis representam 12,64% da área, e conseguiram prever 90,9% dos escorregamentos. Assim, a probabilidade estatística da classe mais suscetível foi de 11,12%.

Com relação a Tabela 5, que apresenta a relação dos escorregamentos do grupo de validação (grupo 2), ou seja, que não foi utilizado para geração do modelo, as áreas das classes são as mesmas da Tabela 4, visto que se trata do mesmo mapa de suscetibilidade. A variação se dá a partir das áreas escorregadas em cada classe, e é normal que os resultados desse processo não sejam tão positivos quanto ao do processo anterior (Tabela 4), visto que aquele foi comparado com o mesmo grupo que gerou o modelo.

Tabela 4 - Probabilidade espacial - grupo de estimação.

Classes	Área (m <sup>2</sup> )	Área escorregada (m <sup>2</sup> )	% área total	% área escorregada	Probabilidade espacial (%)
<b>Muito pouco suscetível</b>	1.174.915.313	0	74,33	0,00	0,00
<b>Pouco suscetível</b>	129.798.906	625	8,21	3,03	0,37
<b>Medianamente Suscetível</b>	76.297.656	1.250	4,83	6,06	1,26
<b>Suscetível</b>	89.866.094	2.812,5	5,69	13,64	2,40
<b>Muito suscetível</b>	109.856.875	15.937,5	6,95	77,27	11,12
<b>Área total</b>	1.580.734.844	20.625	100	100	

Fonte: Autor.

Tabela 5 - Probabilidade espacial - grupo de validação.

Classes	Área (m <sup>2</sup> )	Área escorregada (m <sup>2</sup> )	% área total	% área escorregada	Probabilidade espacial (%)
<b>Muito pouco suscetível</b>	1.174.915.313	1.250	74,33	5,37	0,07
<b>Pouco suscetível</b>	129.798.906	1.250	8,21	5,37	0,65
<b>Medianamente Suscetível</b>	76.297.656	2.343,75	4,83	10,07	2,09
<b>Suscetível</b>	89.866.094	2.500	5,69	10,74	1,89
<b>Muito suscetível</b>	109.856.875	15.937,5	6,95	68,46	9,85
<b>Área total</b>	1.580.734.844	23.281,25	100	100	

Fonte: Autor.

Percebe-se, primeiramente, o volume maior de área escorregada por classe (e consequentemente a área total escorregada), e inicialmente já pode-se perceber que houve área escorregada na classe de menor suscetibilidade (classe muito pouco suscetível). Apesar disso, a área escorregada desta classe foi de 1.250 m<sup>2</sup>, o que significou 5,37% da área total escorregada, em uma classe que representa 74,33% da área total. A segunda classe menos suscetível (pouco suscetível) apresentou a mesma área escorregada, porém a classe representa 8,21% da área total (o que significa uma probabilidade espacial maior). Da mesma maneira que no processo da Tabela 4, as áreas escorregadas também foram aumentando à medida que foram sendo analisadas as classes mais suscetíveis. Porém, de maneira um pouco diferente, visto que houve um salto de área escorregada da classe pouco suscetível para a classe medianamente suscetível (de 1.250 para 2.343,75 m<sup>2</sup>), o que já não ocorreu da classe medianamente suscetível para a classe suscetível (2.343,75 para 2.500 m<sup>2</sup>).

De qualquer maneira, o resultado se mostra bastante positivo quando analisada a classe de maior suscetibilidade, intitulada muito suscetível, visto que apresentou uma área escorregada de 15.937,5 m<sup>2</sup>, o que representa 68,46% do total escorregado, sendo que a classe representa apenas 6,95% da área total. Isso resultou em uma probabilidade espacial de 9,85%. Desta forma, as duas classes mais suscetíveis representam 12,64% da área de estudo, e previram juntamente 79,2% da área escorregada.



## 6 CONCLUSÃO

É compreensível que áreas com movimentos de massa mais expressivos tenham maior apelo tanto para a mídia quanto para estudos científicos, mas cabe salientar que outras áreas também merecem atenção, pois podem causar transtornos, como interrupção de estradas, perdas econômicas como a destruição de cultivos, e dentro do contexto do crescimento urbano, não é descartada a possibilidade de eventos futuros que atinjam de forma mais significativa a população das cidades, como no caso de municípios da área de Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul, principalmente relacionados aos escorregamentos planares que ocorrem ao longo de toda a área de estudo.

A metodologia empregada para avaliação da suscetibilidade a escorregamentos planares buscou estabelecer relações entre as temáticas que mais influenciam nestes processos, tentando aliar as dificuldades de uma base de dados de pouco detalhe que se tem para o estado do Rio Grande do Sul, com imagens de satélite de melhor resolução, e abordagens mais específicas como análises a campo, visando uma observação em “janelas” que buscasse favorecer a compreensão dos movimentos de massa estudados no trabalho.

Os campos realizados foram de grande valia para a compreensão da área de estudo, além de, obviamente, a relevância com relação a localização e conferência de escorregamentos planares. A presença de profissionais e acadêmicos de áreas distintas enriqueceu as análises e colaborou com diferentes conhecimentos. E o fato de ser uma pesquisa desenvolvida ao longo de quatro anos, fez com que mais estudantes e profissionais pudessem colaborar de alguma forma, tanto na teoria quanto na prática.

O método do Valor Informativo foi de fundamental importância para a pesquisa, pois permite a análise *pixel a pixel* na totalidade da área de estudo, gerando um resultado em área bastante próximo de realidade. A dificuldade inicial do trabalho com relação ao baixo número de escorregamentos foi superada de certa forma, porém sabe-se que a existência de um número maior de movimentos favoreceria à pesquisa. De qualquer maneira, buscou-se a melhor relação possível entre a área total de estudo com o número de escorregamentos, chegando, ao final, com a delimitação entre os municípios de Santa Maria e Candelária, dentro dos limites do Rebordo do Planalto.

Diante do exposto, os resultados foram bastante positivos, primeiramente com os testes de sensibilidade das temáticas, que inicialmente destacaram algumas temáticas com boas taxas de sucesso e predição. Da mesma maneira, as taxas foram bastante coerentes entre si, sendo normalmente as taxas de predição um pouco mais baixas que as de sucesso. Ainda neste sentido,

o somatório das temáticas na construção dos modelos resultou em um ganho tanto de sucesso quanto predição, o que também foi coerente com a aplicação da técnica do Valor Informativo, apesar de uma melhora não tão expressiva, o que se justifica, principalmente, pela taxa de sucesso (91%) e predição (90%) já bastante alta da temática de declividade quando analisada isoladamente. De qualquer maneira, o melhor modelo chegou a apresentar uma taxa de sucesso de 95% e de predição de 92%, ou seja, uma melhora de 4% de sucesso e ainda 2% de predição, de uma temática que já apresentava taxas bastante altas.

Ainda sobre o destaque da declividade, pode-se dizer que apesar de ser uma variável que normalmente possui grande influência em análises de escorregamentos, conforme a literatura, inicialmente o seu potencial era questionado frente a delimitação da área. Isso se justifica pelo fato de a área de estudo já destacar especificamente uma região de quebra de relevo, ou seja, sabia-se previamente que declividades mais expressivas eram comuns na área, desta maneira, talvez o método do Valor Informativo viesse a não trazer uma boa resposta da temática devido a esta característica. Porém, mesmo assim, o método destacou fortemente duas classes, a de 30 a 35° e maior do que 35°, e os valores informativos das respectivas classes foi tão significativo que tal destaque fez com que a declividade apresentasse taxas de sucesso e predição bastante elevadas.

Sobre a temática de geomorfologia, devido ao fato de as escalas de dados brasileiros não serem as mais indicadas para este tipo de análise, variando entre 1:250.000 e 1:750.000 (como litologia, solo e geomorfologia), o bom resultado da variável geomorfologia foi analisado com cautela. Dessa forma, os 87% de taxa de sucesso e 82% de predição foram observados com cuidado, e até mesmo esta diferença mais expressiva entre ambas as taxas já demonstra certo grau de “instabilidade” da temática frente à técnica. Até mesmo por este motivo, decidiu-se retirar esta temática do segundo modelo de instabilidade, testando assim a resposta do processamento com outra temática que obteve uma menor taxa de sucesso e predição, porém, que talvez apresentasse uma melhor resposta final, hipótese essa que foi confirmada.

A variável TWI talvez seja um dos diferenciais da pesquisa, visto que não é comumente utilizada em modelos de suscetibilidade. Destaca-se que a variável apresentou um maior valor informativo para a segunda classe mais baixa (valor do *pixel*), e também foi a única que apresentou a mesma taxa de sucesso e predição, o que mostra coerência dos dados, e acabou sendo a terceira temática de melhor resposta do trabalho.

Ainda neste sentido é pertinente destacar o resultado obtido com a hipsometria, que apesar de não estar diretamente ligada a escorregamentos, conforme a literatura, apresentou

75% de taxa de sucesso e 73% de predição, estando presente nos modelos 2, 3 e 4. As classes destacadas foram as de hipsometria média-alta (300 a 400 e 400 a 500), e as classe mais elevadas não apresentaram boa resposta (500 a 600 e maior do que 600 m de altitude). Isso muito possivelmente se justifica pela relação entre estas elevações com as declividades mais acentuadas, também fortemente relacionadas com os escorregamentos.

Foi percebida a relevância que o método dá a extensão de cada classe em cada temática, visto que mesmo que uma classe possua um bom número de escorregamentos, se essa mesma classe possuir uma extensão muito elevada comparada às demais, o seu grau de relevância (Valor Informativo) não será tão expressivo. Assim, ao comparar duas classes de uma mesma temática, mesmo que uma possua um número de movimentos muito maior do que a outra, se esta segunda possuir uma área significativamente menor, pode haver um equilíbrio entre o grau de relevância (VI), podendo até mesmo haver um valor mais expressivo da que possui um número menor de escorregamentos, devido a proporcionalidade (escorregamentos/área total da classe). Essa análise se mostra crucial, pois evita conclusões precipitadas, principalmente quando o nível de detalhamento do dado não é elevado, culminando, normalmente, em um número menor de unidades (classes) e conseqüentemente uma extensão maior delas.

Há de se destacar que apesar de melhora da taxa de predição do último modelo (4), considerado como modelo final da presente pesquisa diante do melhor resultado, os modelos iniciais (1 e 2), já apresentavam uma boa resposta, mesmo com apenas três variáveis. Isso é relevante diante do aproveitamento de um número pequeno de variáveis, mostrando o quão significativa foram estas temáticas para a predição dos escorregamentos planares, o que reforça a importância da escolha das variáveis que compuseram o modelo.

É importante também salientar as possibilidades de inúmeros processamentos que ainda poderiam, e poderão, ser realizadas, visto que além de experimentar outros somatórios, que resultariam em outros modelos, também pode-se acrescentar temáticas que não foram testadas na presente pesquisa. Outra consideração diz respeito aos resultados que foram gerados utilizando metade do inventário como grupo de estimação e outra metade para validação (50/50%). Novos testes poderiam ser efetuados com a utilização de uma proporção diferenciada, o que poderia alterar os resultados de maneira significativa. De maneira geral, só podemos concluir a efetividade de qualquer alteração dentro do método do Valor Informativo, aplicando efetivamente e validando os resultados dos modelos.

Por fim, o fato da existência de um volume relativamente baixo de movimentos de massa na região pode sim ter influenciado nos resultados, visto que as taxas de sucesso e predição foram bastante altas, acima do que comumente é encontrado na literatura. No entanto, não é

possível estabelecer uma relação direta, visto que da mesma maneira que poderia influenciar as taxas de sucesso e predição de maneira positiva, esse argumento também poderia ser utilizado para justificar taxas extremamente baixas, se caso fosse esse o resultado. De qualquer forma, foram analisados 61 escorregamentos com boa distribuição longitudinal ao longo da área de Rebordo do Planalto, o que demonstra a imparcialidade e credibilidade dos dados.

Para futuros trabalhos na área, indica-se a busca pelo maior número possível de escorregamentos, visto que este fenômeno tende a acontecer com certa frequência, e que se atente para movimentos pretéritos, visto que a medida que o tempo passa, as cicatrizes vão desaparecendo, e as informações vão se perdendo. Também é pertinente o teste com o somatório de mais temáticas e, se julgado pertinente, o incremento de alguma nova temática não abordada na presente pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- 0014646**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.gov.scot/Publications/2005/07/08131738/17492>>. Acesso em: 11 abr. 2019.
- 00888\_01**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=9&Cod=888>>. Acesso em: 11 abr. 2019.
- 5081998\_orig**. [s.d.]. Disponível em: <<https://macmun.veebly.com/ch-6-weathering--erosion.html>>. Acesso em: 11 abr. 2019.
- 6a00d8341c630a53ef0148c72ef477970c**. [s.d.]. Disponível em: <<http://latimesblogs.latimes.com/.a/6a00d8341c630a53ef0148c72ef477970c-pi>>. Acesso em: 11 abr. 2019.
- ABELLA, C.; WESTEN, C. J. VAN. Spatial landslide risk assessment in Guantánamo province, Cuba. **Geomorphology**, v. 94, p. 1879-1885, 2008.
- AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais- Proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos de Jordão - SP**. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 58, n. 1, p. 21-44, 1999.
- ARGENTO, M. S. F. Mapeamento Geomorfológico. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994. p. 365-392.
- AUBERTIN, M.; SIMON, R. A damage initiation criterion for low porosity rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 34, n. 3-4, 1997.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização Geológico-Geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: I CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1, 1992, Rio de Janeiro/RJ. **Anais...** Rio de Janeiro/RJ: ABMS/ABGE, 1992.
- AUGUSTO FILHO, O. Escorregamentos em Encostas Naturais e Ocupadas: análise e controle. In: BITAR, O. Y. (Org.). **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente**. São Paulo: IPT - DIGEO, 1993. p. 77-100.
- b7aabb13-2e8d-4ebb-a91b-dd5a344b2f53**. [s.d.]. Disponível em: <<http://file.scirp.org/Html/3-1110069/b7aabb13-2e8d-4ebb-a91b-dd5a344b2f53.jpg>>. Acesso em: 11 abr. 2019.
- BATEIRA, C. V. DE M. **Movimentos de vertente no NW de Portugal, susceptibilidade geomorfológica e Sistemas de Informação Geográfica**. 2001. 490p. Tese (Doutorado em

Geografia Física) - Universidade do Porto, Porto, 2001.

BEHLING, A. A. **Fatores condicionantes dos movimentos de massa no município de Agudo/RS**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2003.

BISPO, P. C. et al. Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial. **Geociências**, v. 30, n. 3, p. 467-478, 2011.

BITAR, O. Y.; FREITAS, C. G. L. DE; FERREIRA, A. L. Classificação da declividade para fins de normalização geotécnica em planejamento urbano: estudos em áreas de domínio pré-cambriano na região sudeste. In: 46º Congresso Brasileiro de Geologia, 1º Congresso de Geologia de Países de Língua Portuguesa, 46, 2012, Santos/SP. **Anais...** Santos/SP: ABGE, 2012.

BONUCCELLI, T. DE J. **Estudo dos movimentos gravitacionais de massa e processos erosivos com aplicação na área urbana de Ouro Preto (MG)-escala 1:10000**. 1999. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Novo Código Florestal. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 1965.

BRASIL. Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2019.

BUDETTA, P.; SANTO, A.; VIVENZIO, F. Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach. **Geomorphology**, v. 94, p. 340-352, 2008.

BURROUGH, P. A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. **Geocarto International**, v. 1, n. 3, 1986.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 3 ed. Brasília: Livros Técnicos e Científicos, 1973.

CARRARA, A.; CROSTA, G.; FRATTINI, P. Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. **Geomorphology**, v. 94, p. 353-378, 2008.

**ce45411947e459a22206d968f3073dfb**. [s.d.]. Disponível em: <<https://i.pinimg.com/564x/ce/45/41/ce45411947e459a22206d968f3073dfb.jpg>>. Acesso em: 11 abr. 2019.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher,

1999.

CHUNG, C.-J.; FABBRI, A. G. Predicting landslides for risk analysis - Spatial model tested by a cross-validation technique. **Geomorphology**, v. 94, p. 438-452, 2008.

CLAESSENS, L. et al. DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, n. 4, p. 461-477, 2005.

CONOSCENTI, C.; MAGGIO, C. DI; ROTIGLIANO, E. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy). **Geomorphology**, v. 94, p. 325-339, 2008.

CREEP. Disponível em: <<http://www.wsgs.wyo.gov/hazards/landslides>>. Acesso em: 07 mar. 2019.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslides: investigation and mitigation. In: TURNER, A. K.; SCHUSTE, L. R. (Eds.). **Landslide types and processes**. Washington, DC: National Research Council, 1996. p. 36-75.

CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. **A questão ambiental: diferentes abordagens**. 4 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.

DEERE, D. U.; PATTON, F. D. Slope Stability in Residual Soils. In: 4th PCSMF, 4, 1971, Porto Rico. **Anais...** Porto Rico: State of the Art Volume, 1971.

DIETRICH, W. E. MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB: a Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential**. National Council for Air and Stream Improvement, 1998.

DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: **Three dimensional applications in Geographical Information Systems**. Londres: Taylor & Francis, 1989. p. 51-77.

DIKAU, R. Mass Movement. In: **Encyclopedia of Geomorphology**. Londres: Routledge, 2004. p. 644-652.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T.; PIERCE, L. E. Land-cover classification and estimation of terrain attributes using synthetic aperture radar. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 1, p. 199-214, 1995.

ERMINI, L.; CATANI, F.; CASAGLI, N. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. **Geomorphology**, v. 66, p. 327-343, 2005.

**escun**. [s.d.]. Disponível em:

<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09d.html>>. Acesso em: 11 abr. 2019.

**escor01**. [s.d.]. Disponível em:

<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/imagens/interacao/escirc.gif>>. Acesso em: 11 abr.

2019.

**escor01.** [s.d.]. Disponível em:

<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09c.html>>. Acesso em: 11 abr. 2019.

**escplan.** [s.d.]. Disponível em:

<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09b.html>>. Acesso em: 11 abr. 2019.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGis, Spatial Analyst, 3D Analyst**, 2010.

EVANS, N. C.; KING, J. P.; WOODS, N. W. Natural terrain landslides hazard in Hong Kong. In: INTERNATIONAL IAEG CONGRESS, 1, 1998, Rotterdam/HO. **Anais...** Rotterdam/HO: Balkema, 1998.

FERNANDES, N. F. et al. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológicogeomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Eds.). **Geomorfologia e meio ambiente**. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. p. 123-194.

FERRERO, V. O. **Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno**. Madrid: E-book, 2004.

FILHO, G. R. O. Os movimentos de massa na região serrana do estado do Rio de Janeiro em 2011 : diagnóstico e proposição de medidas para enfrentamento de desastres ambientais. **CES Revista**, v. 26, n. 1, p. 149-164, 2012.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

FRATTINI, P. et al. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. **Geomorphology**, v. 94, p. 419-437, 2008.

FREIRE, E. S. M. Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. **Revista Construção**, p. 10-18, 1965.

GALLANT, J. C.; WILSON, J. P. Primary topographic attributes. In: GALLANT, J. C. **Terrain Analysis: Principles and applications**. New York: John Wiley, 2000. p. 51-85.

GAO, J. Identification of topographic settings conducive to landsliding from Nelson County, Virginia, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 18, p. 579-591, 1993.

GARCIA, R. A. C.; ZÊZERE, J. L.; OLIVEIRA, S. C. A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a movimentos de vertente. **Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos**, v. 5,

p. 265-279, 2007.

GIS EDITORIAL. GIS technology and models for assessing landslide hazard and risk. **Geomorphology**, v. 94, p. 257-260, 2008.

GRAY, D. Influence of vegetation on the stability of slopes. In: International Conference on the Interaction of Vegetation with Natural and Formed Slopes, 1995, Londres/ING. **Anais...** Londres/ING: Thomas Telford, 1995.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

GUIMARAES, R. F. et al. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: Application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v. 69, n. 1-2, p. 98-108, 2003.

GUIMARÃES, R. F. et al. Avaliação estatística de parâmetros Fito-Morfológicos nas cicatrizes dos movimentos de massa da bacia do rio Quitite, Jacarepaguá (RJ). In: XL BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40, 1998, Belo Horizonte/MG. **Anais...** Belo Horizonte/MG: ABGE, 1998.

GUIMARÃES, R. F. **A modelagem matemática na avaliação de áreas de risco a deslizamentos: o exemplo das bacias dos rios Quitite e Papagaio (RJ)**. 2000. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

GUIMARÃES, R. F. et al. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 159-184.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; PAOLA, R. Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, p. 181-216, 1999.

HAMMOND, E. H. Small-Scale Continental Landform Maps. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 44, n. 1, p. 33-42, 1954.

HENRIQUES, C. da S. **Landslide susceptibility evaluation and validation at a regional scale**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2014.

HERZ, R.; DE BIASE, M. **Critérios e legendas para macrozoneamento costeiro**. Brasília: Ministério da Marinha/Comissão Interministerial para os Recursos do Mar, 1989.

HOEK, E.; BRAY, J. **Rock Slope Engineering**. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, v. 69, n. 1, p. 14-47, 1981.

HUDSON, J. A. **Development of a new methodology for rock engineering design**. Londres: European Research Office of the U.S. Army, 1994.

HUTCHINSON, J. N. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: 5 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 5, 1988, Rotterdam/HO. **Anais...** Rotterdam/HO: Balkema, 1988

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Imagens ALOS PALSAR**, 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento Geomorfológico do Estado de São Paulo**. 2 ed, São Paulo, 1981. 130p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Carta geotécnica dos morros de Santos e São Vicente: condicionantes do meio físico para o planejamento da ocupação urbana**. São Paulo, 1980.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Ocupação de encostas**. São Paulo, 1991.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações**. São Paulo, 2014.

ISRM SUGGESTED METHODS. **Rock Characterization Testing and Monitoring**. Londres: E.T. Brown, 1981. 200p.

ITAQUI, J. **Quarta Colônia - Inventários Técnicos**. Santa Maria: Condesus Quarta Colônia, 2002.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 2 ed. New Jersey: Upper Saddle River, Prentice-Hall, 2007.

JONES, D. Environmental hazards: The challenge of change: Environmental hazards in the 1990s: problems, paradigms and prospects. **Geography**, v. 78, n. 2, p. 161-165, 1993.

JULIÃO, R. P. et al. **Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal**. Lisboa: Autoridade Nacional de Protecção Civil, 2009.

KARMANN, I. Ciclo da Água: água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; TAIOLI, F.; FAIRCHILD, T. (Eds.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 113-138.

KOFFLER, N. F. Carta de declividade da Bacia do Rio Corumbataí para análise digital (SIG). **Geografia**, v. 19, n. 2, p. 167-182, 1994.

KOZCIAK, S. **Análise determinística da estabilidade de vertentes na bacia do Rio Marumbi - Serra Do Mar - Paraná**. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

LECKIE, D. G.; RANSON, K. J. Forestry Applications Using Imaging Radar. In: COLWELL, R. N. **Manual of Remote Sensing**. 2 ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1998. p. 435-511.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LEROUEIL, S. et al. Geotechnical characterization of slope movements. In: 7 INTERNATIONAL SYMPOSIUM. ON LANDSLIDES, 7, 1996, Rotterdam. **Anais...** Rotterdam: Trondheim, 1996.

LEROUEIL, S. Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms. **Géotechnique**, v. 51, n. 3, p. 197-243, 2001.

LIMA, C. A.; SILVA, E. T. J. B.; SANO, E. E. Análise de imagens do ALOS/PALSAR para a discriminação da cobertura vegetal da Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal/RN: **Anais...** Natal/RN: INPE, 2009.

LOAGUE, K.; GANDER, G. R-5 Revisited: spatial variability of infiltration on a small rangeland catchment. **Water Resources Research**, v. 26, p. 957-971, 1990.

LOPES, M. DA C. **Comportamento geotécnico e mecanismos de ruptura em rochas brandas: Mina Córrego do Sítio**. 2006. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

MACEDO, E. S. DE; BRESSANI, L. A. **Diretrizes para o zoneamento da suscetibilidade, perigo e risco de deslizamento para planejamento do uso do solo**. 1. ed. São Paulo: ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABMS - Associação Brasileira de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 2013.

MACIEL FILHO, CARLOS LEITE NUMMER, A. V. **Introdução à geologia de engenharia**. 5. ed. Santa Maria: Editora da UFSM, 2014.

MACMILLAN, R. A.; SHARY, P. A. Landforms and landform elements in geomorphometry. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Londres: Developments in Soil Science, 2008. p. 227-254.

MARCELINO, E. V. **Desasters Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos**. Disponível em: <[http://www.unimedblumenau.com.br/downloads/Site Unimed Vida/DESASTRES NATURAIS E GEOTECONOLOGIAS.pdf](http://www.unimedblumenau.com.br/downloads/Site_Unimed_Vida/DESASTRES_NATURAIS_E_GEOTECONOLOGIAS.pdf)>. Acesso em: 10 mai. 2019.

**mass\_09mudflow**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.glogster.com/taraphoenix/osceola-mud-flow/g-619e1dmcb2a5i95qanebja0>>. Acesso em: 11 abr. 2019.

MASSAD, F. **Obras de Terra: curso Básico de Geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MASSAD, F. **Mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MATSUSHI, Y.; HATTANJI, T.; MATSUKURA, Y. Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrocks in the Boso Peninsula, Japan. **Geomorphology**, v. 76, n. 1-2, p. 92-108, 2006.

MCBRATNEY, A.; MENDONÇA, S. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping.

**Geoderma**, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.

MELCHIORRE, C. et al. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation. **Geomorphology**, v. 94, p. 379-400, 2008.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Sensor Radar de Abertura Sintética. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1. ed. Brasília: UnB/CNPQ, 2012.

MITAS, L.; MITASOVA, H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. **Water Resources Research**, v. 34, n. 3, p. 505-516, 1998.

**MMassa2**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/deslizamentos/>>. Acesso em: 04 mai. 2019.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society American Journal**, v. 57, n. 1, p. 443-452, 1993.

MOORE I. D.; GRAYSON R. B.; LADSON, A. R. Digital Terrain Modelling: A review Of Hydrological, Geomorphological And Biological Applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30, 1991.

MORAES, I. B. C. M. **Mapeamento digital de áreas suscetíveis a escorregamento na parte continental do município de Angra dos Reis, RJ**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MORGENSTERN, N. R. SANGREY, D. A. Methods of Stability Analysis. In: **Landslides: Analysis and Controls**. Washington D.C.: NAS-NRC, 1978. p. 155-171.

NEFESLIOGLU, H. A.; DUMAN, T. Y.; DURMAZ, S. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). **Geomorphology**, v. 94, p. 401-418, 2008.

NETO, J. C. A. da S. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. **Geografia (Londrina)**, v. 22, n. 1, p. 5-25, 2013.

NOWATZKI, A.; SANTOS, L. J. C. O uso de atributos topográficos como subsídio para o mapeamento pedológico preliminar da bacia hidrográfica do rio Pequeno (Antonina/PR). In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMORFOLOGIA, 9, 2012, Rio de Janeiro/RJ. **Anais...** Rio de Janeiro/RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

NUMMER, A. V. **Parâmetros geológico-geotécnicos controladores dos movimentos de massa na Rota do Sol/RS 486 - Itati, RS**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

OLIVEIRA, G. G. 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. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17, 2015, João Pessoa/PB. **Anais...** João Pessoa/PB: INPE, 2015.

ORESQUES, N. Evaluation (not validation) of quantitative models. *Environ. Health Perspect*, v. 106, n. 6, p. 1453-1460, 1998.

PADILHA, D. G. **Geoprocessamento aplicado na caracterização da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Arroio Grande, RS**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

PANIZZA, M. **Environmental geomorphology**. Amsterdam: Elsevier Science, 1996.

PARK, S.; AGYARE, W. A.; AKRAMKHANOV, A. Influence of grid cell size and flow routing algorithm on soil-landform modeling Influence of Grid Cell Size and Flow Routing **Algorithm on Soil-Landform Modeling**, n. 1, 2009.

PEREIRA, S. DA S. **Perigosidade a movimentos de vertente na região norte de Portugal**. 2009. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade do Porto, Porto, 2009.

PFALTZGRAFF, P. A. DOS S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife**. 2007. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PFALTZGRAFF, P. A. S.; ALHEIROS, M. M.; CANDEIAS, A. L. B. Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife. In: 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 11, 2005, Recife/PE. **Anais...** Recife/PE: ABGE, 2005

PIKE, R. J.; HOWELL, D. G.; GRAYMER, R. W. Landslides and Cities: an Unwanted Partnership. In: **Earth Science in the City: a reader**. 56 ed., AGU Spec, 2003. p. 187-254.

PIKE, R. J.; SOBIESZCZYK, S. Soil slip/debris flow localized by site attributes and wind-driven rain in the San Francisco Bay region storm of January 1982. **Geomorphology**, v. 94, n. 3-4, p. 290-313, 2008.

PORTO, E. Z. **Estudo de estabilidade de uma encosta em Faxinal do Soturno – RS**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

POURGHASEMI, H. R. et al. Landslide Susceptibility Mapping Using a Spatial Multi Criteria Evaluation Model at Haraz Watershed. In: IRAN, B. P.; BUCHROITHNER, M. (Eds.). **Terrigenous Mass Movements**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 23-39.

POZZOBON, M. **Análise da suscetibilidade a deslizamentos no município de Blumenau/SC: uma abordagem probabilística através da aplicação da técnica pesos de evidência**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

- PRADO, B. R. DO. **Análise dos dados ALOS/PALSAR (modo de imageamento FBD) para identificação dos tipos de cobertura da terra na região Norte do Estado do Mato Grosso**. 2009. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- PRANDINI, F. L. et al. **Atuação da cobertura vegetal na estabilidade de encostas: uma resenha crítica**. São Paulo: IPT, 1976.
- PRESS, S. **Para entender a Terra**. 4 ed. Bookman, 2006.
- QUINN, P. et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 59-79, 1991.
- RABACO, L. M. L. **Avaliação de modelos de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa numa faixa de dutos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- RAFAELLI, S. G.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M. A comparison of thematic mapping of erosional intensity to GIS-driven process models in an Andean drainage basin. **Journal of Hydrology**, v. 244, n. 1-2, p. 33-42, abr. 2001.
- RAMSAY, J. G.; HUBER, M. I. **The techniques of modern structural geology**. Oxford: Academic Press, 1987.
- REMONDO, J. et al. Validation of landslide susceptibility maps: examples and applications from a case study in northern Spain. **Natural Hazards**, 2003.
- REMONDO, J.; BONACHEA, J.; CENDRERO, A. Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences. **Geomorphology**, v. 94, p. 496-507, 2008.
- RENEAU, S. L.; DIETRICH, W. E. Size and location of colluvial landslides in a steep forested landscape. In: CORVALLIS SYMPOSIUM EROSION AND SEDIMENTATION IN THE PACIFIC RIM (IAHS PUBL.). **Anais...** 1987.
- RICKSON, R. J. Simulated vegetation and geotextiles. In: **Slope stabilization and erosion control a bioengineering approach**. Londres: E&FN Spon, 1995. p. 95-125.
- RIEDEL, P. S. et al. Utilização de mapas de linhas de forma estrutural no Planejamento Regional. In: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, 1996, Salvador/BA. **Anais...** Salvador/BA: ABGE, 1996.
- ROCHA, C. H. B. et al. Comparação de Modelos Digitais de Elevação obtidos a partir de diferentes bases de dados - Curvas de nível e pontos cotados IBGE, Lidar, SRTM e ALOS. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA E XXVI EXPOSICARTA, 27, 2017, Rio de Janeiro/RJ. **Anais...** Rio de Janeiro/RJ: UFRJ, 2017.
- RODRIGUES, B. B. **Inventário e análise de suscetibilidade aos movimentos de massa gravitacionais e erosão na região de Águas de Lindóia/SP-escala 1:10000**. 1998. 390p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

RUFF, D. M.; CZURDA, K. Landslide susceptibility analysis at a regional scale - a qualitative approach at the eastern Alps Gefährdungsanalyse Für Massenbewegungen in Einem Regionalen Maßstab – Ein qualitativer ansatz in Den Ostalpen. In: INTERPRAEVENT. **Anais...**2008.

SAITO, S. **Estudo analítico da suscetibilidade a escorregamentos e quedas de blocos no maciço central de Florianópolis-SC**. 2004. 133p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SALGADO, J. C. R. S. S. **Avaliação e modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente superficiais translativos em Nova Friburgo**. 2013. 93p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade do Porto, Porto, 2013.

SANTOS, H. G. DOS; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. DOS; OLIVEIRA, V. A. DE; LUMBREAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. DE; ARAUJO FILHO, J. C. DE; OLIVEIRA, J. B. DE; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, A. R. **A grande barreira da Serra do Mar: da trilha dos Tupiniquins à Rodovia dos Imigrantes**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2004.

SANTOS, E. P. DOS; SANTOS, R. A. DOS; SANTOS, R. L. Análise de desempenho de filtros de remoção de ruído speckle em imagem SAR (PALSAR-ALOS) com base em medidas de textura. In: VII SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 2017, Salvador/BA. **Anais...** Salvador/BA: UFBA, 2017.

SARTORI, M. DA G. B. A dinâmica do clima do Rio Grande do Sul: indução empírica e conhecimento científico. **Terra Livre**, v. 1, n. 20, p. 27-49, 2003.

SASSA, K. Geotechnical classification of landslides. **Landslide News**, n. 3, p. 21-24, 1985.

SCCOTI, A. A. V.; ROBAINA, L. E. DE S.; TRENTIN, R. Estudo do relevo da bacia hidrográfica do rio Ibicuí com base em parâmetros morfométricos - oeste do Rio Grande do Sul. **Geo UERJ**, n. 29, p. 1-19, 2016.

SCHIRMER, G. J.; TRENTIN, R. Relação entre declividade e usos da terra a partir da classificação de imagens de satélite nos municípios de Dona Francisca, Faxinal do Soturno e Nova Palma-RS. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2013, Foz do Iguaçu/PR. **Anais...** Foz do Iguaçu/PR: INPE, 2013.

SCHMIDT, J.; HEWITT, A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. **Geoderma**, v. 121, n. 3-4, p. 243-256, 2004.

SERVELLO, E. L. **Dados polarimétricos do RADARSAT-2 (banda C) na discriminação de uso e cobertura da Terra na região da floresta nacional dos Tapajós**. 2010. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

SHARPE, C. F. S. **Landslides and related phenomena: a study of mass-movements of soil and rock**. Nova Iorque: Columbia, 1938.

SILVA, G. C. DA. **Proposta metodológica para delimitação automatizada do Rebordo do Planalto entre Santa Maria e Santa Cruz do Sul - RS**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Geografia Bacharelado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

SILVA, J. P.; SILVEIRA, C. T. DA; FIORI, A. P. Aplicação de dois métodos físico-matemáticos para avaliação do índice de estabilidade das vertentes da bacia do rio Ribeirão/Paranaguá-PR. **Revista Geonorte**, v. 2, n. 4, p. 1291-1302, 2012.

SILVEIRA, A.; CUNHA, C. M. L. DA. A influência da declividade nos processos erosivos da bacia do Tijuco Preto - SP. In: VI SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA/REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6, 2006, Goiânia/GO. **Anais...** Goiânia/GO: UFG, 2006.

SILVEIRA, C. T. DA. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: integração de atributos topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e Redes Neurais Artificiais**. 2010. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SILVEIRA, C. T. DA et al. Análise do Fator De Segurança da estabilidade das vertentes na bacia do rio Jacareí, Serra Do Mar Paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 3, p. 287-297, 2013.

SILVEIRA, C. T. DA et al. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa na Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, p. 3-22, 2014.

SILVEIRA, R. M. DA. **Propriedades geotécnicas dos solos coluvionares do gasoduto Bolívia-Brasil em Timbé do Sul (SC)**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J. Slope instability recognition, analysis and zonation. In: **Landslides: Investigation and Mitigation**. Washington, D.C.: National Research Council, National Academy Press, 1996. p. 129-177.

SOUZA, L. A. DE. **Cartografia Geoambiental e Cartografia Geotécnica progressiva em diferentes escalas: aplicação na bacia hidrográfica do Ribeirão do Carmo, municípios de Ouro Preto e Mariana, Minas Gerais**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

STRIEDER, A. J. et al. Predicting favourable areas for landsliding through GIS modelling in Aparados da Serra (Brazil). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTION, MONITORING, SIMULATION, MANAGEMENT AND REMEDIATION OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT AND LANDSCAPE, 2008, Rodes. **Anais...** Rodes, 2008a.

STRIEDER, A. J. et al. Predicting debris flow susceptible areas through GIS modelling in Aparados da Serra (Brazil). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTION, MONITORING, SIMULATION, MANAGEMENT AND REMEDIATION OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT AND LANDSCAPE, 2008, Rodes. **Anais...** Rodes, 2008b.

SÜZEN, M. L.; DOYURAN, V. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. **Environmental Geology**, v. 45, n. 5, p. 665-679, 2003.

TABALIPA, N. L. **Mapeamento geoambiental do Município de Pato Branco, Paraná, como ferramenta para o planejamento territorial e ambiental**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **AGU 1000**, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997.

TEIXEIRA, M. Movimentos de vertente factores de ocorrência e metodologia de inventariação. **Geonovas**, n. 19, p. 95-106, 2005.

TEIXEIRA, M. et al. Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment , NW of Portugal. **Landslides**, v. 12, p. 455-468, 2014.

TERZAGHI, K. **Mechanism of Landslides**. São Paulo: Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico, 1950.

THOMAS, M. F. **Geomorphology in the tropics: A study of weathering and denudation in low latitudes**. Nova Iorque: Willey & Sons, 1994.

TOBIN, G. A.; MONTZ, B. E. **Natural Hazards Explanation and Integration**. New York: The Guilford Press, 1997.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. 1 ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

TOMLIN, C. D. A Map Algebra. In: Proceedings of Harvard Computer Graphics Conference, 1983, Cambridge/CAN. **Anais...** Cambridge/CAN: MA, 1983.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. DE S. Classificação das unidades de relevo através de parâmetros geomorfométricos. **Mercator**, v. 15, n. 3, p. 53-66, 2016.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S.; CRISTO, S. S. V. DE. Considerações geológicas e geomorfológicas sobre o rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. In: SCHUMACHER, M. V. et al. (Eds.). **A Floresta Estacional Subtropical: caracterização e ecologia no rebordo do Planalto Meridional**. Santa Maria/RS: Editora da UFSM. p. 21-32.

UBER, J. A.; ZÊZERE, J. L.; SANTOS, L. J. C. Análise de suscetibilidade aos movimentos de vertente na bacia do Morumbi (Morretes/PR): aplicação do método estatístico multivariado da regressão logística. In: IX Simpósio Brasileiro de Geomorfologia, 9, 2012, Rio de Janeiro/RJ. **Anais...** Rio de Janeiro/RJ: UFRJ, 2012

UNIPAMPA/UFSM. **Desenvolvimento metodológico e tecnológico para a avaliação ambiental integrada aplicada ao processo de análise de viabilidade de hidrelétricas – FRAGRIO**. Santa Maria: Editora da UFSM, [s.a.].

VALERIANO, M. D. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539-546, 2003.

VALERIANO, M. D. M. **Topodata: guia para utilização de dados**. São José dos Campos: INPE, 2008.

VALERIANO, M. D. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Geoprocessamento de Modelos Digitais de Elevação para Mapeamento da Curvatura Horizontal em Microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 1, p. 17-29, 2003.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 72-104.

VAN WESTEN, C. J.; SEIJMONSBERGEN, A. C.; MANTOVANI, F. Comparing landslide hazard maps. **Natural Hazards**, v. 20, p. 137-158, 1999.

VANACÔR, R. N.; ROLIM, S. B. A. Mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos usando técnicas de estatística bivariada e Sistema de Informações Geográficas na região nordeste do Rio Grande Do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 1, p. 15-28, 2012.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. McGraw-Hill do Brasil, 1977.

VARGAS, M.; PICHLER, E. Residual soil and rock slides in Santos (Brazil). In: Pan-American Conference on SMFE, 1, 1957, São Paulo/SP. **Anais...** São Paulo/SP: ABMS, 1957.

VARNES, D. J. Slope movements, types and processes. In: **Landslides and engineering practice**, 1958. p. 20-47.

VARNES, D. J. **Slope movements: types and processes - landslides analysis and control**. Washington: Nacional Academy of Sciences, 1978.

VARNES, D. J. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice**. 3 ed. Paris: Unesco, 1984.

VIEIRA, B. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. 2007. 213p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

VIEIRA, B. C.; RAMOS, H. Aplicação do modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, v. 29, 2015.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to microwave remote sensing**. Flórida: Taylor & Francis, 2006.

XAVIER DA SILVA, J. Geomorfologia e Geoprocessamento. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

YIN, K. L.; YAN, T. Z. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In: 5th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 5, 1988. **Anais...** 1988

Z Aidan, R. T.; FERNANDES, N. F. Zoneamento de susceptibilidade a escorregamentos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do córrego do independência - Juiz de Fora (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, p. 57-76, 2009.

ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 12, n. 1, p. 47-56, 1987.

ZÊZERE, J. L. **Movimentos de vertente e perigosidade geomorfológica na região a norte de Lisboa**. Lisboa: Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, 1997.

ZÊZERE, J. L. et al. Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 4, p. 133-146, 2004.

ZÊZERE, J. L. et al. Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). **Geomorphology**, v. 94, p. 467-495, 2008.