

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAURÍCIO POZZOBON

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS NO MUNICÍPIO DE  
BLUMENAU/SC: UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA ATRAVÉS DA  
APLICAÇÃO DA TÉCNICA PESOS DE EVIDÊNCIA.

CURITIBA

2013

MAURÍCIO POZZOBON

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS NO MUNICÍPIO DE  
BLUMENAU/SC: UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA ATRAVÉS DA  
APLICAÇÃO DA TÉCNICA PESOS DE EVIDÊNCIA.

Tese apresentada como requisito à obtenção do título de Doutor em Ciências Florestais (Área de concentração: Conservação da Natureza), no curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ribas Curcio

CURITIBA

2013

Ficha catalográfica elaborada por Denis Uezu – CRB 1720/PR  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Pozzobon, Maurício

Análise da suscetibilidade a deslizamentos no município de Blumenau, SC: uma abordagem probabilística através da aplicação da técnica pesos de evidência / Maurício Pozzobon. – 2013

137 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ribas Curcio

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 30/08/2013.

Área de concentração: Conservação da Natureza

1. Deslizamento – Avaliação de risco. 2. Deslizamento – Blumenau (SC). 3. Avaliação de risco ambiental. 4. Deslizamento – Fatores de risco. 5. Teses. I. Curcio, Gustavo Ribas. II. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. III. Título.

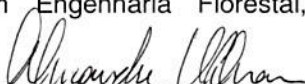
CDD – 551.307

CDU – 551.4


**PARECER**

Defesa n.º. 985

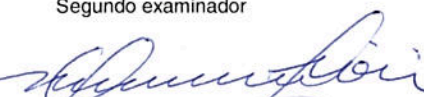
A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) doutorando(a) *Mauricio Pozzobon* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**Análise da suscetibilidade a deslizamentos no município de Blumenau/SC: Uma abordagem probabilística através da aplicação da técnica pesos de evidência**", apresentou parecer favorável pela **aprovação** do acadêmico, pela maioria dos seus membros, havendo um voto de reprovação, manifestado pelo examinador *Dr. Paulo Cesar Soares*. Portanto, o candidato está habilitado ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em CONSERVAÇÃO DA NATUREZA.




*Dr. Alexandre Uhlmann*  
EMBRAPA / FLORESTAS  
Primeiro examinador



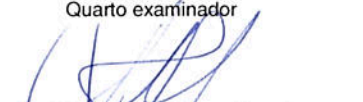
*Dr. Paulo Cesar Soares*  
Universidade Federal do Paraná  
Segundo examinador



*Dr. Alberto Pio Fiori*  
Universidade Federal do Paraná  
Terceiro examinador




*Dr. Claudinei Taborda da Silveira*  
Universidade Federal do Paraná  
Quarto examinador



*Dr. Gustavo Ribas Curcio*  
Embrapa/Florestas  
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 30 de agosto de 2013.



**Antonio Carlos Batista**  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
**Jorge Luis Monteiro de Matos**  
Vice-coordenador do curso

*Em memória às crianças que perderam suas vidas em deslizamentos, porque elas não têm culpa da nossa ignorância.*

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é fruto do envolvimento direto e indireto de diferentes pessoas, sem as quais não teria sido possível realizá-lo, e a elas aqui registro os mais sinceros agradecimentos.

Primeiramente àquelas que, sem dúvida, constituem os alicerces para a edificação de todas as etapas deste processo, a minha amada, amiga, companheira e esposa Luciana e a nossa princesa Maria Lúcia.

A toda nossa família, Mauro, Maria Thereza, Maria Laura, Maria Carolina, Vera, Bernardino, Maria Alice, João Gabriel, Juliano e Rafael, que sempre contribuíram com o suporte necessário durante esta caminhada.

Ao amigo e orientador Gustavo R. Curcio pela paciência, dedicação e coragem em empreender novos desafios.

Destacadamente aos pesquisadores Eduardo Zimmer, Henrique M. C. Carreirão, Leila C. Perdoncini, Manoel R. D. Correia, Renato A. Dedecek, Michele R. Ramos e Alexandre Uhlmann, cujas valiosas contribuições possibilitaram a realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Franklin Galvão, Dr. Claudinei Taborda da Silveira, Dr. Alberto Pio Fiori e Dr. Paulo Cesar Soares pelo incentivo e valiosas contribuições. Através deles, manifesto também o agradecimento à Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Ao professor Dr. Roberto Souza Filho da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) por viabilizar a utilização do aplicativo ArcSDM.

Através dos senhores Fernando F. Xavier, Walfredo Balistieri, João Paulo K. Kleinubing, Marcelo Schurubbe e Napoleão Bernardes faço o registro do agradecimento à Prefeitura de Blumenau pela viabilização das pesquisas realizadas, em especial aos servidores da Diretoria de Geologia, Análise e Riscos Naturais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de doutoramento, e ao Centro Nacional de Pesquisas Florestais (EMBRAPA Florestas) por disponibilizar os laboratórios para análises físico-hídricas.

*“...para cada espécie, entidade ou fenômeno, existem problemas importantes para solução, aos quais objetos específicos de pesquisa serão ajustados...você encontrará sua própria maneira de descobrir, de aprender e ensinar”.*

Eduard O. Wilson

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>8</b>
<b>2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>10</b>
2.1. GEOLOGIA.....	11
2.2. GEOMORFOLOGIA .....	16
2.3. PEDOLOGIA .....	19
2.4. VEGETAÇÃO .....	22
2.5. CLIMA REGIONAL E A METEOROLOGIA DO EVENTO DE 2008 .....	23
<b>3. ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS: APLICAÇÃO DA TÉCNICA PESOS DE EVIDÊNCIA EM UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE BLUMENAU/SC .....</b>	<b>25</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	25
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	27
3.2.1. Elaboração dos mapas temáticos .....	27
3.2.1.1. Unidades Geológicas .....	28
3.2.1.2. Elaboração do Modelo Digital do Terreno e dos Mapas Derivados.....	29
3.2.1.2.1. Lineamentos morfoestruturais.....	31
3.2.1.2.2. Orientação das vertentes .....	33
3.2.1.2.3. Curvatura horizontal .....	35
3.2.1.2.4. Curvatura vertical .....	35
3.2.1.2.5. Declividade .....	36
3.2.1.3. Cobertura e uso do solo .....	40
3.2.1.3.1. Uso do Solo .....	40
3.2.1.3.2. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) .....	43
3.2.2. Inventário das cicatrizes de deslizamento e definição dos pontos de treinamento .....	46
3.2.3. A técnica de análise espacial pesos de evidência .....	48
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	56
3.4. CONCLUSÕES .....	82
<b>4. ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS ATRAVÉS DA COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO MUNICÍPIO DE BLUMENAU/SC .....</b>	<b>84</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	84
4.2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	85
4.2.1. Obtenção e preparo dos dados.....	85
4.2.2. Análise dos dados .....	87
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	90
4.4. CONCLUSÕES .....	121
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>123</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>126</b>



## RESUMO

A despeito da histórica recorrência de desastres naturais registrados no município de Blumenau/SC, o evento meteorológico extremo de 2008 figura como novo paradigma regional no que se refere à gestão de riscos e desastres, em virtude da manifestação generalizada de deslizamentos e processos correlatos. Movimentos de massa gravitacionais resultam da combinação favorável de condições, presumindo a existência de relações funcionais entre a distribuição espacial dos fatores condicionantes e dos deslizamentos, sendo possível calcular a probabilidade de sua ocorrência e gerar cartas organizadas em classes de suscetibilidade a partir do inventário das cicatrizes de deslizamento e das variáveis que influenciam para que este evento ocorra. Neste sentido, constitui objetivo principal deste trabalho a análise das relações espaciais entre deslizamentos ocorridos e um conjunto de potenciais fatores condicionantes e, a partir desta análise, propor e testar modelos de suscetibilidade. A aplicação da regra de Bayes da probabilidade condicional, através da técnica de modelagem espacial pesos de evidência, permitiu analisar as relações espaciais entre um conjunto de potenciais fatores condicionantes (geológicos, geomorfológicos e de uso e cobertura do solo) e 294 deslizamentos translacionais ocorridos no evento de 2008 na área de estudo. A rotina de análise foi conduzida considerando toda a área de estudo, bem como para cada um dos dois compartimentos geomorfológicos delimitados para a área de estudo. Diferentes combinações de integração dos valores ponderados de cada fator foram elaboradas no intuito de identificar àquela que resulta no melhor ajuste em relação à independência espacial entre os temas e à eficiência de classificação. Considerando o território do município como um todo, o modelo que combina os valores ponderados dos fatores declividade, curvatura horizontal e distância de lineamentos morfoestruturais foi o que melhor atendeu os requisitos de independência condicional combinado à razoável ajuste de classificação e de predição. Através da análise segregada, considerando os compartimentos geomorfológicos isoladamente, foi possível identificar para o Compartimento 1, que a combinação dos pesos dos temas distância de lineamentos, orientação das vertentes, curvatura horizontal e declividade apresentou os melhores ajustes. Este modelo apresentou uma eficiência de classificação da ordem de 87%, e de predição da ordem de 83%, permitindo reconhecer que cerca de 25% da área deste compartimento compreendem situações de alta a muito alta suscetibilidade. No caso do Compartimento 2, a combinação dos temas distância de lineamentos, orientação das vertentes, curvatura horizontal, declividade e uso do solo resultou em uma eficiência de classificação da ordem de 73%, aliada a uma eficiência de predição de 70%. Este modelo permite identificar que, cerca de 25% da área do Compartimento 2 compreende situações de elevada suscetibilidade. Desta forma, somando as áreas classificadas de ambos os compartimentos, é possível reconhecer que 25% (aproximadamente 129 Km<sup>2</sup>) do município compreendem situações de alta a muito alta suscetibilidade a deslizamentos translacionais.

**Palavras-chave:** análise da suscetibilidade; probabilidade condicional; deslizamentos translacionais.

## ABSTRACT

Despite the historical recurrence of natural disasters recorded in the municipality of Blumenau/SC, the extreme weather event of November 2008 figure as a regional new paradigm in relation to management of risks and disasters, because of the widespread occurrence of landslides and related processes. Gravitational mass movements result from the combination of favorable conditions, assuming the existence of functional relationships between the spatial distribution of conditioning factors and the landslides, allowing to calculate the probability of its occurrence and generate charts arranged in classes of susceptibility from the inventory of landslide scars and the variables that influence this event occurs. Therefore, the aim objective of this work is to contribute to the process of managing the risks associated with translational landslides in the Blumenau municipality, by analyzing the spatial relationships between landslides and a set of potential conditioning factors and, from these analyzes, propose and testing susceptibility models. The application of Bayes rule of conditional probability, using the technique weights of evidence, allowed to analyze the spatial relationship between a set of potential conditioning factors (related to geological, geomorphological and land cover aspects) and 294 translational landslides occurred in 2008 event in the study area. The routine analysis was conducted considering the entire study area and for each of the two compartments delimited from the geotectonic domains recognized. Different combinations of weighted values of each factor were prepared in order to identify the one that results in the best fit in relation to spatial independence between the themes and the efficiency of classification. Considering the territory of the municipality as a whole, the model that combines the weighted values of the factors slope, plan curvature and distance from lineaments, what was best met the requirements for conditional independence with reasonable classification and prediction efficiency. Through the analysis considering the geomorphological domains as a criterion for partitioning the study area, was possible to identify for Compartment 1 that the combination of the weights of the factors distance from lineaments, aspect, plan curvature and slope presents the best settings. This model had an classification efficiency of about 87%, and one prediction power of about 83%, allowing recognize that 25% of this compartment include areas classified as high to very high susceptibility. In the case of the Compartment 2, the combination of the themes distance from lineaments, aspect, plan curvature, slope and soil use resulted in an classification efficiency of about 73%, together with a prediction efficiency of about 70%, allowing to identify about 25% of this area comprises situations of high susceptibility. Therefore, adding areas classified as both compartments, it is possible to recognize that 25% (approximately 129 km<sup>2</sup>) of the study area include situations of high to very high susceptibility to landslides translational.

**Key-words:** susceptibility analysis; conditional probability; translational landslides.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento da população humana, acompanhado pela intensificação da urbanização, impõe uma série de desafios às sociedades modernas, dentre os quais se destaca a gestão de riscos associados a processos naturais perigosos.

Os desastres naturais ocorridos nos últimos anos em diferentes regiões ao longo costa atlântica brasileira, muitos deles associados à ocorrência generalizada de deslizamentos de encostas durante episódios de chuvas intensas, atestam a necessidade premente de desenvolvimento de diferentes estratégias que, sinergicamente, destinem-se a mitigar as consequências decorrentes de fenômenos dessa natureza.

O município de Blumenau/SC tem sido palco recorrente de desastres naturais. Contudo, as lições deixadas pelo evento meteorológico extremo de novembro de 2008, figuram como novo paradigma regional no que se refere à gestão de riscos e desastres, sobretudo em razão da manifestação generalizada de deslizamentos e processos correlatos.

A elaboração das estratégias de prevenção e redução dos riscos envolve uma série de questionamentos, constituindo etapa fundamental o conhecimento dos fenômenos que representam ameaças potenciais.

No que se refere aos deslizamentos de encostas, a identificação dos locais que reúnem atributos favoráveis, conferindo-lhe maior probabilidade à ocorrência dos movimentos, poderá orientar o desencadeamento das demais ações relacionadas à gestão dos riscos. Esta etapa é definida como análise da suscetibilidade.

Razões de ordem prática restringem o conhecimento exato das condições de estabilidade para extensas áreas, implicando na adoção de técnicas de modelagem espacial.

Diferentes abordagens podem ser utilizadas no desenvolvimento de modelos de suscetibilidade, dentre as quais se destacam as que adotam como premissa a ideia de que os movimentos de massa gravitacionais resultam da combinação de condições favoráveis, presumindo a existência de relações funcionais entre fatores condicionantes e os deslizamentos.

Através da abordagem probabilística, as relações entre os fatores condicionantes e os deslizamentos podem ser inferidas a partir de medidas de associação espacial, empregando formulações derivadas do teorema de Bayes para determinar a probabilidade de ocorrer um evento, dado a presença de um condicionante.

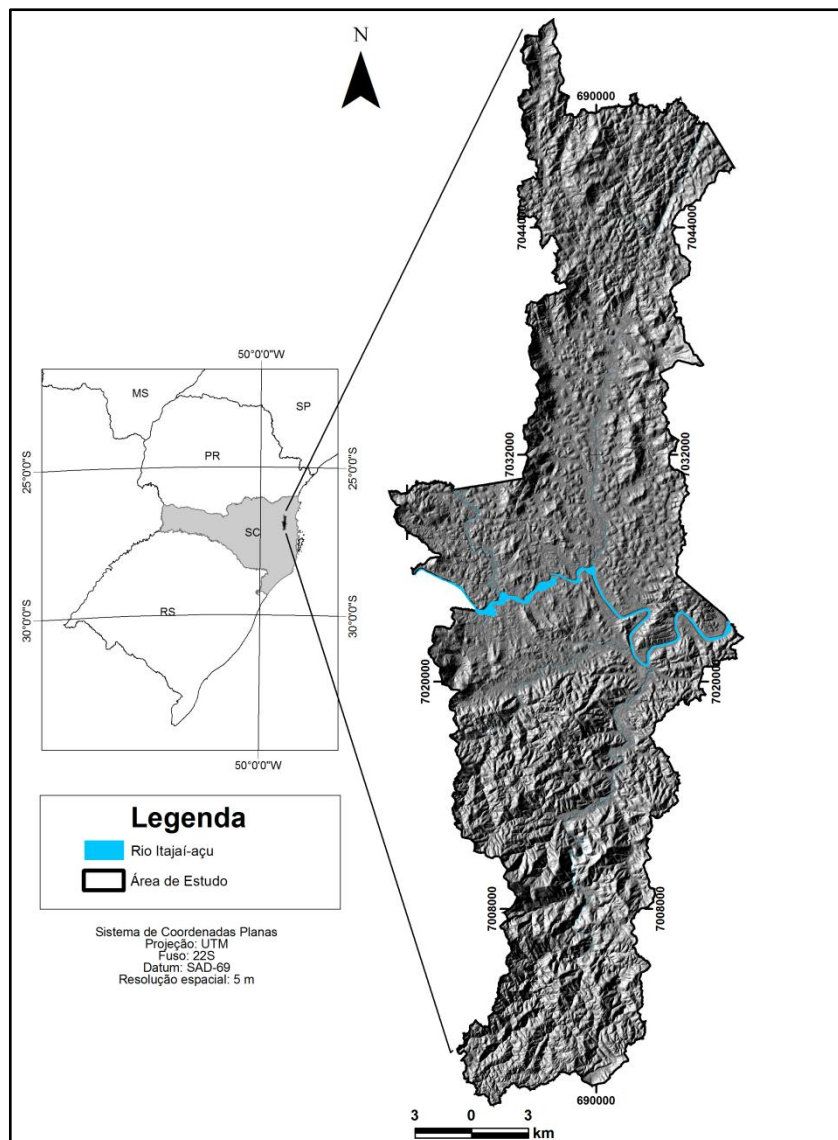
Assim, este trabalho procura demonstrar a hipótese de que, segundo um modelo de evento e um conjunto de variáveis ambientais georreferenciadas (potenciais fatores condicionantes), é possível determinar o peso da atuação de cada variável no favorecimento à ocorrência do evento e então, a partir da integração dos pesos de diferentes variáveis e da realização de testes de validação, definir a combinação de fatores que melhor traduz a suscetibilidade a deslizamentos para a área de estudo.

Neste sentido, constitui objetivo principal deste trabalho a análise das relações espaciais entre deslizamentos ocorridos no evento de 2008 e um conjunto de potenciais fatores condicionantes e, a partir desta análise, propor e testar modelos de suscetibilidade a deslizamentos translacionais, na escala de 1:25.000, para o município de Blumenau.

Para tanto, o trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos, incluindo este introdutório. O segundo capítulo destina-se a uma caracterização da área de estudo sobre os aspectos geológico, geomorfológico, pedológico, vegetacional e climático. O terceiro capítulo trata da análise da suscetibilidade através da aplicação da técnica pesos de evidência considerando o território do município como um todo. O quarto capítulo concentra-se em apresentar e discutir os resultados da análise da suscetibilidade a deslizamentos através da compartimentação geomorfológica da área de estudo. No quinto e último capítulo, por sua vez, são discorridas as considerações finais.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho refere-se ao município de Blumenau, cuja área é de 520,9 Km<sup>2</sup>. Está localizado na porção nordeste do estado de Santa Catarina, na região do médio vale do Itajaí, e conta com uma população de 316.139 habitantes (IBGE 2012). A Figura 2.1 apresenta a localização geral do município e, em destaque, o relevo da área representado pelo modelo de elevação sombreado, demonstrando a distribuição heterogênea de modelados. Elemento fisiográfico de destaque, o rio Itajaí-açu, divide o território em duas porções de tamanho aproximado, no sentido norte-sul.



**Figura 2.1** – Área de estudo, município de Blumenau, Santa Catarina.  
**Fonte:** Adaptado da base planialtimétrica da Prefeitura Municipal de Blumenau (AEROIMAGEM 2003).

## 2.1. GEOLOGIA

O município de Blumenau está inserido no contexto geológico do embasamento pré-Cambriano de Santa Catarina, caracterizado pelos domínios tectônicos do Cráton Luis Alves e do Cinturão Dom Feliciano (Basei 1985, Castro et al. 2003, Basei et al. 2011).

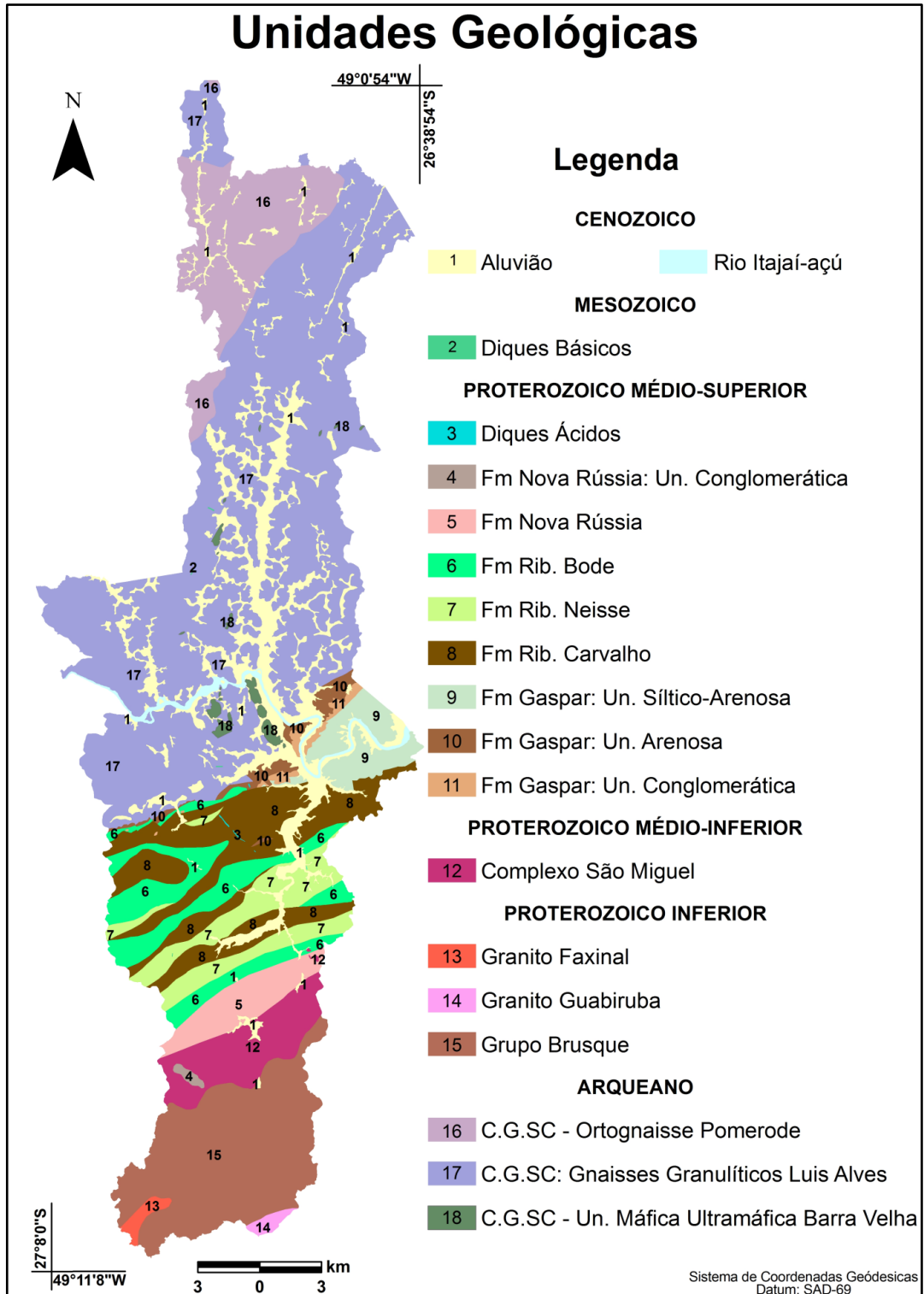
No domínio do Cráton Luis Alves predominam os gnaisses do Complexo Granulítico de Santa Catarina. O Cinturão Dom Feliciano está representado pelos domínios *foreland* (Grupo Itajaí) e supracrustal (Complexo São Miguel e Grupo Brusque) (Basei 1985, Castro et al. 2003, Basei et al. 2011). Corpos intrusivos diferenciam-se nos granitos Faxinal e Guabiruba, além de diques ácidos (Proterozóico Médio-Superior) e básicos (Paleozóico) (Hartmann et al. 1979, Kaul 1980, Silva & Dias 1981, Basei 1985, Awdziej et al. 1986, Caldasso et al. 1995, Castro et al. 2003; Schroeder 2006, Basei et al. 2011 e Iglesias et al. 2011) (Figura 2.2).

Os depósitos aluvionares preenchem as planícies e os respectivos leitos fluviais da área de estudo, apresentando sedimentação detrítica predominantemente psamo-pelítica, não raro com espessuras superiores a 15 metros (Figura 2.2).

Como se pode notar na Figura 2.2, predominam as rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina (C.G.SC), estando concentradas na região central e norte da área de estudo.

O Complexo Granulítico de Santa Catarina está representado pelas unidades Ortognaisse Pomerode, Gnaisses Granulíticos Luis Alves e pela unidade Máfica-Ultramáfica Barra Velha (Iglesias et al. 2011).

A unidade Ortognaisse Pomerode compreende gnaisses tonalíticos, granodioríticos foliados a bandados, localmente porfíricos e com enclaves de metagabros e hornblenditos. Enquanto que a unidade Gnaisses Granulíticos Luis Alves compreende os gnaisses enderbítico, charnoenderbito e trondhjemitito, exibindo rochas bandadas, com orientação planar subparalela de seus constituintes leucocráticos (quartzo-feldspáticos) e prismáticos (piroxênios e anfibólios). Por sua vez, a unidade Máfica-Ultramáfica Barra Velha está representada por piroxenitos, noritos, gabronitos, gabros e os magnetititos, com proporções variadas de clino e ortopiroxênio, hornblenda, e de plagioclásio (Silva & Dias 1981, Iglesias et al. 2011).



**Figura 2.2** – Mapa das unidades geológicas do município de Blumenau, Santa Catarina. Fm., corresponde ao termo Formação; Un. à Unidade; C.G.SC, Complexo Granulítico de Santa Catarina.

**Fonte:** Adaptado de Silva & Dias (1980), Awdziej et al. (1986), Basei et al. (2011), Iglesias et al. (2011) e Perdoncini et al. (2013).

Contrapondo à relativa monotonia geológica observada na região norte, a porção sul da área de estudo é caracterizada pela sequência das rochas

sedimentares do Grupo Itajaí, justapostas aos gnaisses retrabalhados do Complexo São Miguel, e estes por sua vez às rochas metassedimentares do Grupo Brusque (Figura 2.2).

O Complexo São Miguel encontra-se representado na área por migmatitos estromáticos. Segundo Basei (1985), esta formação (Faixa Ribeirão da Prata para o autor) resultaria de um retrabalhamento das litologias do Complexo Granulítico na borda sul do Cráton do Rio de La Plata. O seu desenvolvimento, ocorrido no início do Ciclo Brasileiro, estaria relacionado com grandes falhas inversas, com sentido de deslocamento de sudeste para noroeste que, reativadas no final da orogênese, colocariam o Grupo Brusque sobre as litologias do Complexo São Miguel e esta sobre os sedimentos do Grupo Itajaí.

O Grupo Brusque (Basei 1985, Basei et al. 2011), ou Complexo Metamórfico Brusque (Rostirolla 1991, Castro et al. 2003, Phillip et al. 2004) é constituído preferencialmente por metassedimentos representados por metapelitos, metapsamitos e rochas metacarbonáticas com intercalações de rochas calcossilicáticas e metabásicas, de baixo grau metamórfico (xisto verde a anfíbolito), organizadas, conforme Phillip et al. (2004), em cinco subunidades, quais sejam: clástica, química, clástico-química, metavulcânica básica e magnésiana. Na área de estudo, o Grupo Brusque está representado predominantemente pelas unidades da fácies pelítico-arenosa (Caldasso et al. 1995).

Esta unidade apresenta-se intrudida por dois corpos granitóides, denominados Faxinal (biotita-hornblenda, sienito a sieno-monzogranito, metaluminoso, alcalino, do tipo A) e Guabiruba (sieno e monzogranitos a granodioritos, quimismo predominantemente metaluminoso a peraluminoso, cálcioalcalinos a alcalinos, gerados a partir de fonte mista) (Fornazzari Neto & Ferreira 2003).

O Grupo Itajaí distingue unidades psamo-psafíticas, apresentadas por diferentes autores sob nomenclaturas e classificações estratigráficas distintas, aqui representadas pelas Formações Gaspar, Ribeirão Carvalho, Ribeirão Neisse, Ribeirão do Bode e Nova Rússia, da base para o topo. Compreende uma bacia tipo antepaís do Cinturão Dom Feliciano, depositada no final do Neoproterozóico, entre 600 e 560 Ma (Basei et al. 2011), caracterizada por um empilhamento de rochas



sedimentares com marcada contribuição turbidítica, afetada por importante atividade vulcânica félsica (Rostirolla 1991).

A unidade basal, a Formação Gaspar (Formação Baú de Basei et al. 2011 ou Unidade A de Rostirolla 1991) é representada por arenitos e conglomerados depositados em sistemas deltaicos e aluviais.

As sequências intermediárias seguintes correspondem à Formação Campo Alegre (Silva & Dias 1981) ou Unidades B, C e porção inferior da D (Rostirolla 1991) ou Formação Ribeirão Carvalho, Ribeirão Neisse e Ribeirão do Bode (Basei et al. 2011). Foram depositadas em sistema marinho, e correspondem a turbiditos rítmicos síltico-argilosos proximais (Formação Ribeirão Carvalho), siltitos e arenitos arcoseanos intermediários (Formação Ribeirão Neisse), e os turbiditos sílticos distais da Formação Ribeirão do Bode.

No topo da sequência, sucedem arenitos e conglomerados depositados em sistemas deltáicos e fluviais (Unidade D de Rostirolla, 1991; Formação Baú de Basei et al., 2011) ora nominados pertencentes à Formação Nova Rússia.

Os pacotes sedimentares encontram-se intrudidos por rochas vulcânicas félsicas da Formação Apiúna e pelo granito Subida (Basei et al., 2011), sem no entanto estarem representados na área de estudo.

Na Formação Gaspar (Formação Baú para Basei et al., 2011 e Unidade A para Rostirolla, 1991) é possível distinguir três unidades, quais sejam: a arenítica, a conglomerática e a síltico-arenosa (Perdoncini et al., 2013).

A fácies arenítica consiste em arenitos e arcóseos de coloração marrom-arroxeadada, com granulometria média a grossa, exibindo má seleção e subarredondamento dos grãos. Compõem camadas tabulares, com a ocorrência de níveis conglomeráticos residuais. As estruturas sedimentares predominantes são a estratificação cruzada acanalada ou tabular, a estratificação plano-paralela, as feições de escavação e ainda as ondulações linguóides (Rostirolla 1991, Basei et al. 2011).

A fácies seguinte é composta por conglomerados polimíticos, contendo seixos de rochas metamórficas de médio e alto grau, intraclastos arenosos e argilosos e raramente seixos de rochas ígneas ou metamórficas de baixo grau. Os seixos são arredondados, com baixa esfericidade, e a matriz é síltico-arenosa, de coloração marrom arroxeadada. A estrutura sedimentar apresenta uma estratificação

plano-paralela marcada por diferenças granulométricas. Não raro, importantes descontinuidades apresentam-se na forma de intercalações lenticulares de arenito feldspático, de granulometria média a grossa e de coloração marrom-arroxeadada, contendo estratificações plano-paralela e cruzada acanalada (Rostirolla 1991, Basei et al. 2011).

A fácies siltico-arenosa é caracterizada por siltitos laminados e argilitos marrom-avermelhados, com intercalações subordinadas de arenitos de granulometria muito fina, os quais formam camadas com espessuras que variam de 1 cm a até 2 m. As lentes de arenito intercaladas revelam-se menores que 2 cm de espessura e apresentam base abrupta como também topo gradacional. Alguns horizontes silticos contêm intraclastos de argilitos que acompanham a laminação (Rostirolla 1991, Basei et al. 2011).

Segundo Basei et al. (2011), sobrepostos a Formação Gaspar ocorrem os sedimentos rítmicos da Formação Ribeirão Carvalho, resultantes de contribuição turbidítica proximal, podem ser divididos em dois tipos principais de rocha: 1) Os ritmitos compostos de arenitos médios a finos, intercalados por folhelhos, siltitos, arenitos de granulação média a grosseira; 2) Os ritmitos representados por corpos maciços, ligeiramente canalizados, e compostos predominantemente de areia média a grossa, intercalados a arenitos mais finos e folhelhos, interpretados como turbiditos de transição, intercalados com níveis de conglomerados polimíticos de estrutura maciça.

Os ritmitos da Formação Ribeirão Carvalho são recobertos e em contato gradacional com a Formação Ribeirão Neisse, a qual é composta de arenitos arcóseos, de cor cinza, finos a médios, mal selecionados, mostrando estratificação plano-paralela e laminação cruzada associada a marcas de ondas (Basei et al. 2011).

A Formação Ribeirão do Bode é composta por siltitos finamente laminados, com camadas siltico-argilosas, alternadas com níveis siltico-arenosos e níveis de siltitos maciços subordinados. Os siltitos laminados, cinza-esverdeados, constituem camadas métricas de tamanho com laminação plano-paralela, podendo ocorrer associado a conglomerados polimíticos com clastos de vulcânicas ácidas (Basei et al. 2011).

Rostirolla (1991) reconhece cinco fácies sedimentares para a Unidade D ou Formação Nova Rússia, distinguindo: 1) arenitos arcossianos, de granulometria média, com gradação normal; 2) conglomerados gradacionais suportados por seixos e níveis arenosos estratificados; 3) arenitos quartzosos e arcósios, de granulometria fina a grossa, granocrescência ascendente e geometria sigmoidal; 4) siltitos e argilitos marrom-avermelhados, formando camadas sem estrutura interna aparente, em alguns casos com interlaminações de arenitos muito finos; 5) conglomerados suportados por seixos de composições diversas e com matriz arcossiana.

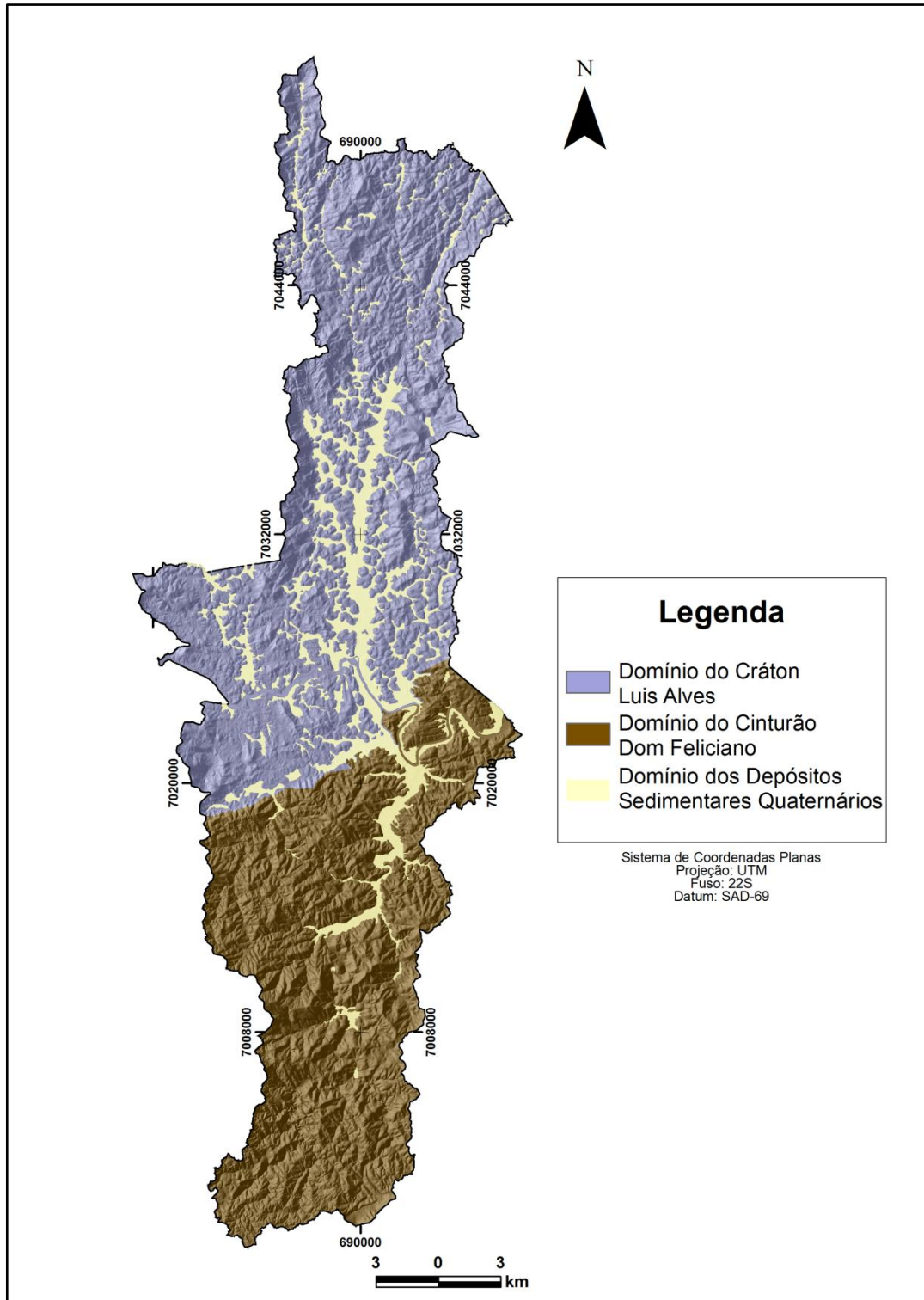
Conforme Rostirolla (1991), embora a Formação Nova Rússia (Unidade D para o autor) apresente semelhanças lito-texturais com a Formação Gaspar, pode ser diferenciável em termos de processos deposicionais e ambientes de sedimentação, somando-se o fato de não apresentarem uma continuidade física, e estarem separadas por um intervalo pelítico.

Completando o cenário litológico, da forma como é possível representá-lo no momento, diques félsicos, de idade proterozóica (médio a superior), ocorrem intrudidos na Formação Gaspar e, por vezes, na Formação Ribeirão Carvalho, enquanto que diques de diabásio e basalto alcalino, de idade mesozóica, afloram em pequenos segmentos, intrudindo essencialmente em unidades do Complexo Granulítico e do Grupo Itajaí (Silva & Dias, 1981).

## **2.2. GEOMORFOLOGIA**

A organização dos fatos geomorfológicos, considerando a distribuição dos condicionantes de natureza litoestrutural, permite identificar que na área de estudo encontram-se representados os domínios morfoestruturais dos Crátons (Cráton Luis Alves) e dos Cinturões Móveis (Cinturão Dom Feliciano), ambos de idade Neoproterozóica, e dos Depósitos Sedimentares Quaternários (IBGE, 2009).

A Figura 2.3 apresenta a área de abrangência dos grandes domínios morfoestruturais presentes na área de estudo, representando o relevo da área através do modelo de elevação sombreado, demonstrando a distribuição dos diferentes tipos de modelados.



**Figura 2.3** – Mapa da área de abrangência dos domínios morfoestruturais na área de estudo.

**Fonte:** Adaptado da base planialtimétrica da Prefeitura Municipal de Blumenau (AEROIMAGEM 2003), e de IBGE (2009).

O domínio morfoestrutural do Cráton Luis Alves, designado como Embasamento em Estilos Complexos em IBGE (2004a), corresponde à porção mais antiga da crosta terrestre no sul do Brasil, compreendendo os terrenos pré-

cambríânicos que, do ponto de vista litoestratigráfico correspondem a rochas de caráter metamórfico em decorrência da atuação de processos de metamorfismo regional no final do Arqueano Tardio e durante o Proterozóico Inferior (IBGE 2002a). Diferentes eventos geodinâmicos definiram um padrão de dobramentos de difícil resolução, com fortes transposições, diferentes graus de metamorfismo, diaftorese ou retrometamorfismo e intensa tectônica rígida do tipo fraturamentos e cisalhamentos, além de variados padrões de microdobras (IBGE 2002a). Compreendem áreas que há muito tempo encontram-se tectonicamente estáveis, com envolvimento parcial na tectônica do Ciclo Brasileiro (Neoproterozóico) e que, a partir de sua estabilização, se submeteram somente a transformações em regime distensional (IBGE 2002a).

Considerando a abrangência deste domínio na área de estudo e a classificação disposta em IBGE (2004a), é possível identificar que nele se manifesta a unidade geomorfológica denominada Serras Cristalinas Litorâneas. Esta unidade encerra formas resultantes de modelado de dissecação, em decorrência de processos erosivos vinculados às dinâmicas pluvial e fluvial, onde predominam formas de relevo do tipo colinoso, outeiro e montanhoso, e fases entre plano a montanhoso, com predominância de vales em “V” aberto, drenagem dendrítica, controle estruturo-escultural e dissecação fluvial média a baixa (IBGE 2002b) (Figura 2.3).

O domínio morfoestrutural do Cinturão Dom Feliciano, designado como Coberturas Molassóides e Vulcanitos Associados em IBGE (2004a), está representado na área de estudo pelas unidades *foreland* (Grupo Itajaí) e supracrustal (Complexo São Miguel e Grupo Brusque) (Basei 1985, Castro et al. 2003, Basei et al. 2011).

Neste compartimento se destacam as feições geradas durante a transição Neoproterozóico/Cambriano na formação do Gondwana ocidental, bem como as relacionadas à reativação mesozóica, responsável pelo rifteamento precursor do oceano Atlântico Sul. A sequência vulcano-sedimentar do Grupo Brusque foi deformada e metamorfizada no Ciclo Brasileiro, em um primeiro evento colisional. Um segundo evento orogênico deformou inclusive os sedimentos mais jovens do Grupo Itajaí, com vergência para NW, colocando as litologias situadas a SE sobre os

terrenos granulíticos do Cráton Luis Alves (Basei 1985, IBGE 2002, Castro et al. 2003, Basei et al. 2011).

Considerando a abrangência do domínio morfoestrutural Cinturão Dom Feliciano na área de estudo e a classificação disposta em IBGE (2004a), é possível identificar que o mesmo está representado pela unidade geomorfológica denominada como Serrania do Alto e Médio Itajaí-Açu. Constitui área onde o relevo apresenta maior grau de dissecação, conformando montanhas e escarpas com contrastes altimétricos acentuados, vertentes de alta declividade com fases de relevo predominantemente ondulado a escarpado, fina densidade de drenagem, vales profundos (“V” fechado) normalmente balizados por planos aluviais descontínuos e localizados nos altos cursos de rios que pertencem à bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (IBGE 2002b) (Figura 2.3).

O domínio morfoestrutural Depósitos Sedimentares Quaternários encerra na área de estudo a unidade geomorfológica denominada Planícies Aluviais, que corresponde aos terraços e planícies elaboradas pelos depósitos aluvionares inconsolidados oriundos da deposição fluvial, que em alguns casos se interdigitam aos de origem coluvionar, em decorrência da atuação de um sistema morfoclimático quente e úmido atuante na área desde o final do último período glacial quaternário (IBGE 2002b) (Figura 2.3).

A este sistema morfoclimático quente e úmido é também atribuída a intensa erosão fluvial responsável pelos modelados montanhosos e escarpado que ocorrem na área de estudo. Já a convexidade das formas colinosas, detidamente no domínio do Cráton Luis Alves, está relacionada às sucessivas fases de retomadas erosivas ocasionadas pela recorrência das oscilações climáticas de longa duração que ocorreram ao longo de todo o período quaternário (IBGE 2002b).

### **2.3. PEDOLOGIA**

A despeito de não ter sido feito levantamento sistemático visando o mapeamento pedológico da área de estudo em escala de detalhe, mas tomando-se como referência os trabalhos de IBGE (2003) e Potter et al. (2004), e observações de campo, é possível afirmar que a área de estudo é composta, predominantemente, por solos representativos das ordens dos Neossolos, Gleissolos, Cambissolos e Argissolos.

As planícies e terraços fluviais do domínio morfoestrutural dos Depósitos Sedimentares Quaternários são compostas predominantemente por Neossolos Flúvicos, Cambissolos Flúvicos e Gleissolos (IBGE 2003, Potter et al. 2004). Solos minerais que apresentam evolução pedogenética vinculada aos processos de sedimentação (aluvial ou alúvio-coluvionar) e a diferentes regimes de hidromorfia.

Os Neossolos Flúvicos compreendem volumes pedogeneticamente pouco desenvolvidos, com horizonte A normalmente do tipo moderado e, abaixo deste, composto por camadas estratificadas sem relação pedogenética entre si, de composição química, mineralógica e granulométrica variada e sem disposição preferencial (IBGE 2003, Santos et al. 2006).

Os Cambissolos Flúvicos referem-se aos solos que apresentam incipiente evolução pedogenética a partir de sedimentos de natureza aluvionar, manifestada pela presença de horizonte diagnóstico B incipiente (Bi) e, abaixo deste, caráter flúvico dentro dos primeiros 120 cm a partir da superfície do solo. O caráter flúvico caracteriza-se pela distribuição errática do conteúdo de carbono orgânico em profundidade e/ou de camadas estratificadas em 25% ou mais do volume de solo (Santos et al. 2006).

Os Gleissolos são solos formados principalmente a partir de sedimentos, estratificados ou não, e sujeitos a constante ou periódico excesso de água, desenvolvendo-se em sedimentos recentes nas planícies de inundação e em materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfia. Apresentam horizonte diagnóstico glei dentro de 150 cm de profundidade e se caracterizam, portanto, pela forte gleização resultante dos processos de intensa redução de compostos de ferro, manifestando cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas. São solos que ocasionalmente podem ter textura arenosa (areia ou areia franca) somente nos horizontes superficiais, desde que seguidos de horizonte glei de textura franca arenosa ou mais fina (Santos et al. 2006).

Na área de estudo, os ambientes de encosta dos domínios morfoestruturais do Cráton Luis Alves e do Cinturão Dom Feliciano são constituídos predominantemente por Neossolos (Litólicos e Regolíticos), Cambissolos e Argissolos (IBGE 2003, Santos et al. 2006). Todos solos minerais (Santos et al. 2006), com expressão diferenciada dos processos pedogenéticos e de intemperismo, resultando em ampla variação nas espessuras dos perfis de

alteração, onde, no domínio das rochas do Cráton Luis Alves os mesmos podem apresentar profundidades da ordem de 30 m, enquanto que, sobre as rochas do domínio do Cinturão Dom Feliciano, desenvolvem-se perfis que raramente ultrapassam espessuras superiores a 06 m.

Os Neossolos Litólicos e Regolíticos compreendem solos pouco evoluídos. A primeira subordem designa os solos com horizonte A ou hístico assentes diretamente sobre a rocha, ou sobre um horizonte C ou CR, ou sobre material com 90% ou mais de seu volume constituído por fragmentos de rocha de diâmetro maior que 2 mm, com contato lítico dentro de 50 cm de profundidade. A segunda subordem refere-se aos solos com contato lítico a uma profundidade maior que 50 cm e horizonte A sobrejacente a horizonte C ou Cr, admitindo horizonte Bi com menos de 10 cm de espessura (Santos et al. 2006). Na área de estudo, estes solos ocorrem preferencialmente em fases de relevo montanhoso e escarpado (Potter et al. 2004). Em função do pequeno grau de evolução pedogenética, apresentam as mais diversas características, muitas delas influenciadas diretamente pelo material parental. Podem apresentar textura média a argilosa (Potter et al. 2004). Em virtude da pequena espessura, aliada à grande quantidade de cascalho e pedregosidade, apresentam pequena capacidade de armazenamento d'água que, associado aos demais atributos do ambiente de ocorrência, conferem-lhe elevada suscetibilidade aos processos erosivos.

Os Cambissolos compreendem solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente (Bi) imediatamente abaixo do horizonte A ou horizonte hístico com espessura inferior a 40cm (Santos et al. 2006). São considerados pouco evoluídos pedogeneticamente e por este motivo têm suas características fortemente influenciadas pelo material de origem. Apresentam textura média a argilosa, mais raramente muito argilosa, sendo sempre dessaturados por bases, com teores médios a altos em relação ao alumínio trocável (Potter et al. 2004). As profundidades são muito variáveis e dependem de uma série de fatores como: tipo e estrutura da rocha de origem, grau de evolução, forma da encosta e declive, além da posição na paisagem. Atributos que também irão influenciar na maior ou menor suscetibilidade destes solos aos processos erosivos.

Os Argissolos apresentam horizonte B textural (Bt) com argila de atividade baixa imediatamente abaixo do horizonte A ou E (Santos et al. 2006). Assim como



os demais solos, são dessaturados por bases e com teores médio a alto de alumínio trocável, apresentando textura binária, predominando a composição média/argilosa na área de estudo. Sua estrutura é predominantemente em blocos, em grau moderado/fortemente desenvolvida (Potter et al. 2004). Diferenças de composição granulométrica, porosidade e estrutura existentes entre os horizontes A e Bt, podem resultar em discontinuidades com relação à condutividade hidráulica ao longo do perfil (menor no Bt) (Sartori et al. 2005). A disposição destes solos na paisagem se dá, preferencialmente, nos terços médio e inferior das encostas, em fases de relevo ondulado a montanhoso o que, conciliado aos seus atributos físico-hídricos, conferem-lhe elevada suscetibilidade à erosão.

## **2.4. VEGETAÇÃO**

Enfatizando os aspectos vinculados à vegetação natural da área de estudo, cabe mencionar que esta integra o Bioma Mata Atlântica, no domínio da região fitoecológica da Floresta Ombrófila Densa, representada pelas classes de formação conhecidas como Fluvial, Submontana, Montana e Altomontana (Veloso & Klein 1957, Klein 1979, Klein 1980, Leite & Klein 1990, Sevegnani 2002, Vibrans 2003, IBGE 2012, Vibrans et al. 2013).

Segundo Klein (1979), a vegetação da Floresta Ombrófila Densa, na vertente atlântica do estado de Santa Catarina, poderia ser caracterizada originalmente por sua exuberância, resultante da variedade de formas de vida que a compunha, incluindo considerável diversidade de espécies arbóreas, cujas copas amplas formavam um dossel contínuo, com expressiva profusão de trepadeiras e epífitas nos galhos e troncos, de arbustos no sub-bosque e de herbáceas compondo o estrato inferior.

Atualmente, essa vegetação abrange 40,1% de sua cobertura original no estado (Vibrans et al. 2013), com o estrato arbóreo apresentando, em média, densidade da ordem de  $619 \text{ ind. ha}^{-1}$ , área basal de  $21,7 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ , altura de fuste de 5,6 m e altura do dossel da ordem de 17 m (Sevegnani et al. 2013). Apesar do expressivo número de espécies identificadas através do Inventário Florístico Florestal do Estado de Santa Catarina, com cerca de 1.900 espécies vasculares registradas, Sevegnani et al. (2013), relatam que a alta representatividade de espécies arbóreas pioneiras nos remanescentes florestais constitui forte argumento

na afirmação de que essas formações encontram-se muito alteradas e em processo de sucessão secundária, resultando em um padrão de mosaico, onde se manifestam todos os estágios sucessionais (Vibrans et al. 2013).

## **2.5. CLIMA REGIONAL E A METEOROLOGIA DO EVENTO DE 2008**

O clima da região pode ser caracterizado como temperado úmido com verões quentes e invernos brandos (*cfa*) segundo a classificação de Köppen (1948), com temperaturas médias anuais entre 18°C e 20°C e com pluviosidade variando entre 1.600 e 1.800 mm anuais.

O comportamento climatológico da precipitação mensal de Blumenau apresenta uma estação chuvosa no verão (dezembro a março), um período mais seco entre abril e julho e uma estação chuvosa secundária nos meses de setembro e outubro (Severo 2009).

O evento meteorológico extremo de 2008, ao qual se vincula a ocorrência dos deslizamentos utilizados como referência no presente trabalho, pode ser compreendido como a associação de dois cenários predisponentes à manifestação generalizada das instabilidades em taludes e encostas naturais registradas na área de estudo (Silva Dias 2009, Severo 2009). O primeiro deles resulta de um acumulado de precipitações contínuas a partir do mês de julho e que se intensificaram a partir de outubro daquele ano, quando foram registradas as primeiras anomalias, com valores acumulados (353,2 mm) que superaram as médias históricas em cerca de 3 vezes (Silva Dias 2009, Severo 2009). O segundo cenário passa a se configurar a partir do dia 18 de novembro, com o ápice nos dias 22 e 23, quando os totais diários registrados ficaram torno de 250 mm de chuva. O acumulado mensal resultou em 1.001,7 mm, superando em 6 vezes a média histórica (Severo 2009).

A evolução da chuva horária foi registrada pelas estações automáticas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e, segundo Silva Dias (2009) e Severo (2009), dentre as estações posicionadas no caminho aparente do fluxo de umidade advindo do oceano (localizada no município de Itapoá/SC), e que alcançou a área de estudo, os acumulados horários máximos ficaram em torno de 30 mm.h<sup>-1</sup>, e o maior valor registrado foi de 47 mm.h<sup>-1</sup>.

Através de uma análise sinótica do evento, Severo (2009) sugere que as chuvas de novembro de 2008 estiveram associadas a um sistema atmosférico com uma extensão vertical de alguns poucos quilômetros, com mecanismo transportador da umidade localizado rente à superfície e a umidade associada com as chuvas de origem oceânica, em razão da predominância de ventos que sopravam do quadrante leste durante os episódios de maior precipitação.

A despeito da histórica recorrência de desastres naturais, o evento pluviométrico extremo de novembro de 2008 figura como um novo paradigma regional no que se refere à gestão de riscos e de desastres naturais. Revelou de forma contundente a existência de condições de elevada suscetibilidade natural, em virtude da manifestação generalizada de movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos, incorrendo em sérios prejuízos humanos, ambientais e materiais (Aumond & Sevegnani 2009; Frank & Sevegnani 2009; CEPED UFSC 2012).

### **3. ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS: APLICAÇÃO DA TÉCNICA PESOS DE EVIDÊNCIA EM UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE BLUMENAU/SC**

#### **3.1. INTRODUÇÃO**

Dentre os importantes processos geomórficos modeladores da superfície terrestre, destacam-se os movimentos de massa gravitacionais (Chorley & Kennedy 1971, Christofolletti 1974, Chorley et al. 1984, Summerfield 1991, Dikau 2004).

O termo genérico deslizamentos aplica-se a uma variedade de tipos de movimentos de massa, resultantes da atuação da gravidade sobre condições ambientais instáveis. Diferentes geometrias de ruptura sugerem também a atuação diferenciada dos mecanismos de instabilização e dos agentes deflagradores. O deslocamento de material ocorre em diferentes velocidades, variando desde rastejos a movimentos muito rápidos e, a despeito de tratar-se de um processo natural, sua ocorrência pode ser induzida, desde que sejam artificialmente modificadas as condições de estabilidade (Zaruba & Mencil 1982, Guidicini & Nieble 1984, Varnes 1984, Chorley et al. 1984, Cruden & Varnes 1996, Fernandes & Amaral 1996, Dikau 2004).

Deslizamentos translacionais compreendem movimentos de massa gravitacionais quando o desprendimento de material se desenvolve através de rupturas não circulares e a mobilização, com dinâmica translacional, se processa sobre um ou mais planos de deslizamento (Dikau 2004). As superfícies de ruptura podem se desenvolver em diferentes profundidades e envolver diferentes tipos de materiais inconsolidados, desde blocos de rocha inalterada, rocha alterada ou horizontes pedogenéticos (Cruden & Varnes 1996; Augusto Filho & Virgili 1998; Dikau 2004; Fiori & Carmignani 2009).

Ao longo da costa atlântica brasileira, a deflagração natural desses fenômenos está fortemente vinculada a episódios de chuvas intensas (Wolle & Pedrosa 1981; Ahrendt & Zuquette 2003; Vedovello & Macedo 2007, CEPED UFSC 2012). As instabilidades se manifestam preferencialmente em zonas de convergência hídrica, onde o manto de regolito atinge uma máxima espessura, conforme um limite crítico de declividade imposto por relações locais de equilíbrio dinâmico (Cruden & Varnes 1996, Dikau 2004, Matsushi et al. 2006; Fiori &

Carmignani 2009). Nas condições em que houver água suficiente e a topografia favorecer a convergência dos detritos nos canais naturais de escoamento, o material mobilizado poderá originar fluxos de detritos, amplificando seus efeitos diretos e indiretos (Cruden & Varnes 1996, Dikau 2004, Matsushi et al. 2006).

Em razão dos efeitos decorrentes, os deslizamentos podem representar sérias ameaças às sociedades modernas, sobretudo na perspectiva de crescimento da população humana e do processo de ocupação desordenada do solo. Danos e perdas ambientais, de ordem social, econômica e natural de diferentes portes e extensões estão associados à ocorrência de deslizamentos, que afetam regiões ricas ou pobres, áreas urbanas ou rurais, e comunidades preparadas ou não para enfrentá-los (Vedovello & Macedo 2007).

O planejamento do uso e ocupação do solo é apontado como a medida mais eficiente para evitar ou reduzir os danos e prejuízos decorrentes de movimentos de massa (Vedovello & Macedo 2007). Neste caso, a identificação dos locais que apresentam predisposição natural para a ocorrência do fenômeno, constitui etapa primária no processo de análise e avaliação dos riscos associados, constituindo-se elemento norteador do planejamento territorial.

A análise de suscetibilidade permite a identificação da potencialidade de ocorrência do fenômeno, e pode ser conduzida por modelos empíricos (análise da distribuição dos movimentos de massa e de mapeamentos geológico-geotécnicos), ou através da aplicação de modelos matemáticos (determinísticos ou probabilísticos) (Montgomery & Dietrich 1994, Wu & Sidle 1995, Zuquette & Nakazawa 1998, Van Westen et al. 2001, Soares et al. 2002, Araújo 2004, Fernandes et al. 2004, Sassa et al. 2004, Kozciak 2005, Remondo et al. 2005, Lee et al. 2007, Mathew et al. 2007, Neuhäuser & Terhorst 2007, Poli & Sterlacchini 2007, Dahal et al. 2008, Guimarães et al. 2008, Revellino et al. 2008, Tabalipa & Fiori 2008; Fiori & Carmignani 2009; Quinn et al. 2010, Regmi et al. 2010, Vieira et al. 2010, Oh & Lee 2011, Ozdemir 2011, Vergari et al. 2011, Armas 2012, Kayastha et al. 2012, Pereira et al. 2012, Prasannakumar & Vijith 2012).

A confiabilidade das previsões na avaliação do fator de segurança de taludes e, conseqüentemente, seus custos, aumentam quanto maior o grau de detalhamento dos parâmetros de campo e do entendimento dos processos envolvidos na sua estabilidade (Bigarella et al. 2003). Dessa forma, razões de

natureza prática limitam o conhecimento exato da estabilidade de todos os taludes, para extensas áreas, exigindo a adoção de técnicas de seleção, generalização, adição e transformação da informação para que possam ser relacionadas, correlacionadas, interpretadas e representadas em cartas para usos específicos (Zuquette & Gandolfi 2004, Zuquette & Nakazawa 1998).

Movimentos de massa resultam da combinação de condições favoráveis, presumindo a existência de relações funcionais entre os fatores condicionantes e a distribuição dos mesmos, tornando possível calcular a probabilidade de sua ocorrência e gerar cartas com distribuição de valores, organizados em classes de suscetibilidade. A abordagem probabilística permite, então, delimitar unidades do meio físico conforme o grau de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa, utilizando um modelo de evento e um conjunto de variáveis espaciais georreferenciadas (Soares et al. 2002).

As variáveis espaciais comumente utilizadas na análise de suscetibilidade dizem respeito principalmente a características geológicas (tipos litológicos e características estruturais), geomorfológicas (inclinação/relevo, formas e exposição de rampas, entre outras) e padrões de uso e ocupação do solo (Van Westen et al. 2001, Soares et al. 2002, Araújo 2004, Sassa et al. 2004, Remondo et al. 2005, Lee et al. 2007, Mathew et al. 2007, Neuhäuser & Terhorst 2007, Poli & Sterlacchini 2007, Dahal et al. 2008, Oh & Lee 2011, Ozdemir 2011, Vergari et al. 2011, Armas 2012, Kayastha et al. 2012, Pereira et al. 2012, Prasannakumar & Vijith 2012).

No presente estudo foi empregada a técnica de modelagem espacial pesos de evidência (Bonham-Carter 1994), pautada nos princípios da regra de Bayes da probabilidade condicional, com o objetivo de identificar condicionantes ambientais regentes da distribuição espacial dos movimentos gravitacionais de massa com dinâmica translacional, propor e testar modelos de suscetibilidade para o território do município de Blumenau, Santa Catarina, Brasil.

## **3.2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.2.1. Elaboração dos mapas temáticos**

Foram utilizados nove temas de evidências (Quadro 3.1). A seleção inicial destes considerou atributos do meio físico (geológicos e geomorfológicos) e do padrão de cobertura do solo, que representam potenciais indicadores de

favorabilidade para a composição de modelos de suscetibilidade a deslizamentos com dinâmica translacional.

**Quadro 3.1** – Relação dos temas de evidências utilizados para análise de favorabilidade e composição de modelos de suscetibilidade a deslizamentos translacionais, município de Blumenau, Santa Catarina, Brasil.

Nº	Tema de Evidência	Fonte	Escala de Mapeamento	Resolução Espacial
1	Unidades geológicas	A partir da compilação de:		
		Silva e Dias (1981)	1:50.000	-----
		Awdziej et al. (1986)	1:250.000	
		Iglesias <i>et al.</i> (2011)	1:250.000	-----
		Basei <i>et al.</i> (2011)	1:250.000	-----
		Perdoncini <i>et al.</i> (2013)	1:25.000	-----
2	Distância de lineamentos morfoestruturais	Modificado de Silva e Dias (1981).	1:50.000	
		Ajustes a partir da interpretação do Modelo Digital do Terreno (MDT)	1:25.000	5 m
3	Orientação de vertente	Extraído a partir do MDT	1:10.000	5 m
4	Curvatura horizontal	Extraído a partir do MDT	1:10.000	5 m
5	Curvatura vertical	Extraído a partir do MDT	1:10.000	5 m
6	Declividade	Extraído a partir do MDT	1:10.000	5 m
7	Uso do Solo	Fotointerpretação de imagens do satélite Quickbird® (2008)	1:10.000	60 cm
8	Índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI	Imagens TM Landsat 5® (2006)	-----	30 m com reclassificação para 5 m

### 3.2.1.1. Unidades Geológicas

Em razão de não se dispor de mapeamento em escala compatível com a desejada para toda a área de estudo, a elaboração do mapa das unidades geológicas (Figura 2.2) ocorreu mediante a integração de dados de distintas fontes, e que representam a geologia da área através de diferentes escalas de mapeamento. Assim, o estabelecimento dos limites entre as diferentes unidades partiu sempre da maior para a menor escala disponível.

Os limites entre as unidades do Complexo Granulítico de Santa Catarina e as unidades do Grupo Itajaí, incluindo a espacialização das três unidades da Formação Gaspar (arenítica, siltico-argilosa e conglomerática), resultou de dados obtidos através de mapeamentos realizados pela Diretoria de Geologia, Análise e Riscos Naturais da prefeitura de Blumenau, na escala 1:25.000 (Perdoncini et al. 2013).

Os demais limites estabelecidos para as unidades do Grupo Itajaí e aqueles que delimitam a abrangência do Complexo São Miguel foram definidos a partir dos dados disponíveis em Basei et al. (2011), em escala de 1:250.000. Os limites das unidades ao sul do Complexo São Miguel foram definidos a partir dos dados disponíveis em Awdziej et al. (1986).

A espacialização das Unidades Máfica Ultramáfica Barra Velha e dos Gnaisses Granulíticos Luis Alves foi elaborada a partir dos dados disponíveis em Silva & Dias (1981), na escala 1:50.000, com a porção extremo norte da área de estudo não coberta pelo referido mapeamento, tendo sido ajustada a partir dos dados disponíveis em Iglesias et al. (2011), na escala 1:250.000.

Os dados cartográficos de Silva & Dias (1981) foram obtidos de uma versão analógica. A conversão para ambiente digital foi realizada através do processo de rasterização da respectiva carta geológica (Folha SG.22-Z-B-IV-4 Blumenau). Os dados de Awdziej et al. (1986) e Basei et al. (2011) foram acessados no formato digital, mas em estrutura matricial. Os dados matriciais foram georreferenciados (UTM - SAD69) e posteriormente vetorizados no aplicativo ArcGIS 10.1 (ESRI®). Os dados obtidos de Iglesias et al. (2011) em estrutura vetorial, foram acessados de arquivos baixados via FTP da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais.

As classes do tema de evidência que representa as unidades geológicas compreendem dados de natureza qualitativa nominal de variação discreta, tendo sido utilizado o método categórico para a análise de favorabilidade, conforme disposto em Bonham-Carter (1994).

### 3.2.1.2. *Elaboração do Modelo Digital do Terreno e dos Mapas Derivados*

Os dados utilizados para a elaboração do modelo digital do terreno (MDT) da área de estudo, advém da base planialtimétrica do município de Blumenau, produto



da restituição de levantamento aerofotogramétrico (Aeroimagem 2003), elaborada na escala 1:10.000, com curvas de nível equidistantes em 5 m.

Como etapa preliminar ao processo de interpolação para geração do MDT, os dados vetoriais foram processados em uma rede triangular irregular (TIN, *Triangular Irregular Network*). Compreende um modelo de dados tridimensionais, formado por triângulos adjacentes e não superpostos, calculados a partir da articulação de vértices representados por pontos de coordenadas tridimensionais irregularmente distribuídos na superfície amostrada (Longley et al. 2013).

A rede irregular foi gerada na extensão 3D Analyst do software ArcGIS 10.1 (ESRI®), que emprega o algoritmo de triangulação de Delaunay. A partir da TIN, também em ambiente ArcGIS 9.2 (ESRI®), foi elaborado o MDT através de interpolação pelo método do “vizinho natural”, resultando em uma malha regular de 5 x 5 m, conforme a base planialtimétrica adotada. O MDT compreende uma estrutura matricial de armazenamento dos dados, o que a torna útil para a representação da variação contínua de superfícies (Silveira 2010).

Através do MDT foram realizadas as derivações básicas da informação topográfica através do cálculo de atributos primários e secundários do relevo, tornando possível: i) Representar a clinografia da área de estudo através dos mapas de declive organizados em classes de valores expressos em graus e em percentuais; ii) Elaborar o mapa de segunda derivada, utilizado para mapear automaticamente as formas das vertentes (vertical e horizontalmente) e; iii) Representar a orientação das encostas através do mapa de azimutes do relevo, definido a partir das direções de declive. O processo de derivação da informação topográfica para geração dos produtos que representam os diferentes atributos morfométricos foi conduzido no ambiente do aplicativo ArcGIS 10.1 (ESRI®).

Além de permitir as derivações da informação topográfica, o MDT foi utilizado também para: i) Elaborar os mapas de sombreamento, para visualização da conformação do terreno, simulando diferentes opções de iluminação; ii) Ajustar e refinar o traçado dos lineamentos morfoestruturais e; iii) Ortoretificar as imagens de satélite utilizadas no inventário das cicatrizes de deslizamento (“*training points*”) e no mapeamento dos padrões de cobertura do solo na área de estudo.

### 3.2.1.2.1. *Lineamentos morfoestruturais*

Os lineamentos morfoestruturais constituem feição saliente no relevo, topograficamente representadas por cristas ou vales alinhados, de disposição regular, retilínea ou curva, e podem apresentar um conjunto de lineações paralelas (Soares & Fiori 1976). Constituem importantes discontinuidades no relevo e zonas de desenvolvimento preferencial de linhas de drenagem retilíneas (Soares et al. 2007) representando, portanto, potencial indicador de favorabilidade à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa.

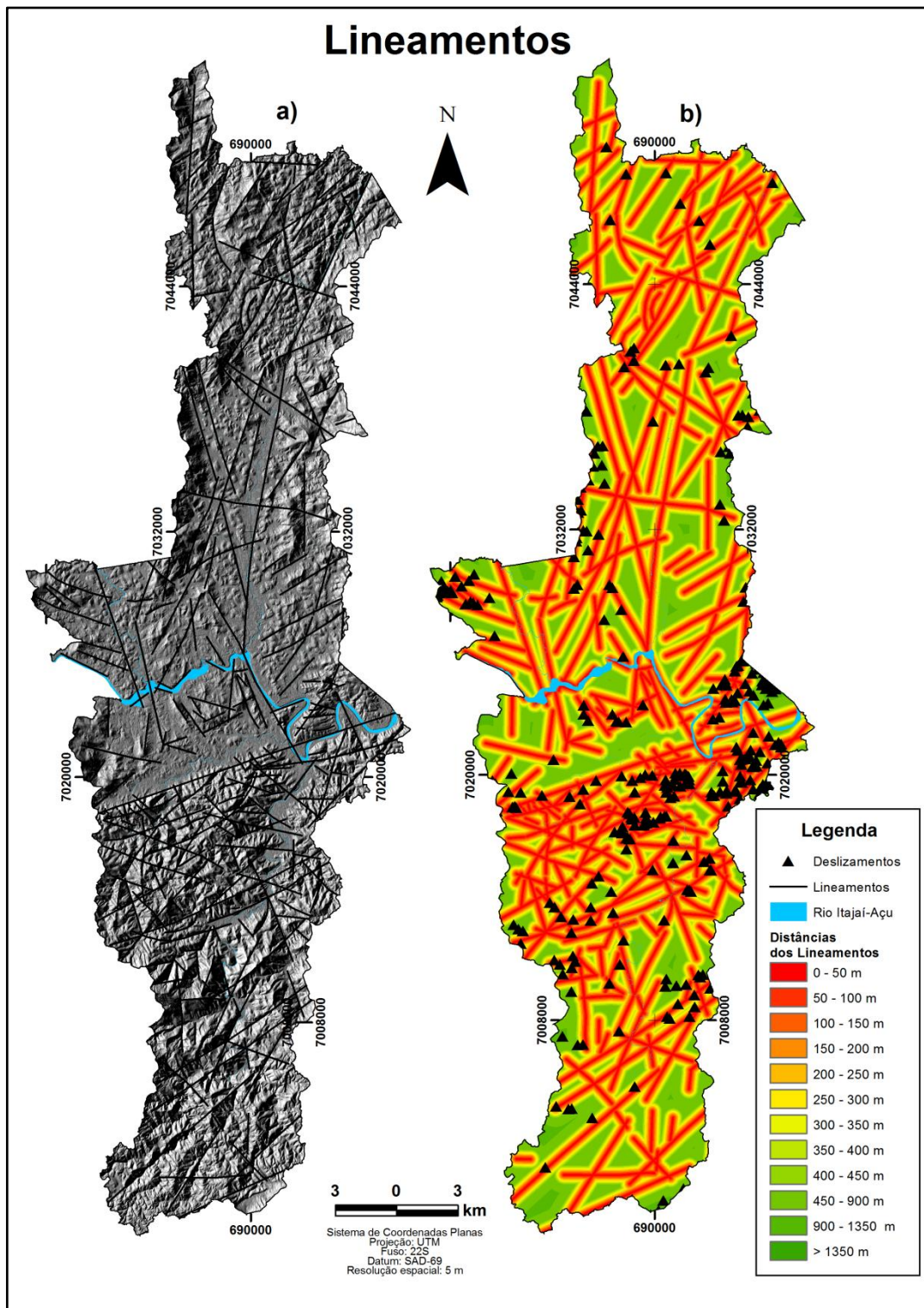
As expressões topográficas retilíneas, a exemplo das linhas ou segmentos de escarpas, trechos de rios e depressões alongadas, foram adotadas como critérios na identificação dos lineamentos. Os traços foram vetorizados a partir da interpretação do mapa de relevo sombreado com iluminação simulada em diferentes direções.

Uma vez editados os traços correspondentes aos elementos extraídos de Silva & Dias (1981), estes foram sobrepostos ao mapa de relevo sombreado elaborado a partir do MDT. O traçado dos lineamentos foi então refinado e ajustado, contando com operações de superposição e seleção a partir da comparação aos elementos elaborados por Silva & Dias (1980). Foram considerados os lineamentos mais coincidentes em presença, extensão e orientação e, portanto, mais consistentes e representativos de estruturas tectônicas. O programa ArcGIS 10.1 (ESRI®) foi utilizado para realizar todas as etapas do processo de edição dos traçados dos lineamentos interpretados.

A análise da associação espacial entre os deslizamentos (*“training points”*) e a presença de lineamentos, partiu da premissa de que os efeitos destes como condicionantes à ocorrência dos deslizamentos seriam atenuados na medida em que se distanciam dos mesmos, adotando-se neste caso o método de ponderação acumulativa descendente, conforme disposto em Bonham-Carter (1994), uma vez que compreendem dados de natureza qualitativa ordinal.

Para tanto, foram estabelecidas faixas de distância (*“buffers”*) a partir do centro dos traços dos lineamentos, com intervalos de 50 m para cada lado, até a distância de 450 m. As duas faixas seguintes compreendem intervalos de 350 m. A

última faixa, por sua vez, compreende então as áreas fora do raio de 1.350 m a partir dos traços dos lineamentos, resultando em 12 classes de distância.



**Figura 3.1** – Mapas de lineamentos morfoestruturais onde: a) Traços originais delineados a partir da interpretação do relevo sombreado e; b) Faixas de distância adotadas para a análise através do método cumulativo descendente.

A Figura 3.1a ilustra o mapa dos traços de lineamentos morfoestruturais sobre o relevo sombreado, enquanto que a Figura 3.1b representa o mapa das faixas de distância a partir dos traços, conforme utilizado no processo de ponderação dos indicadores de favorabilidade.

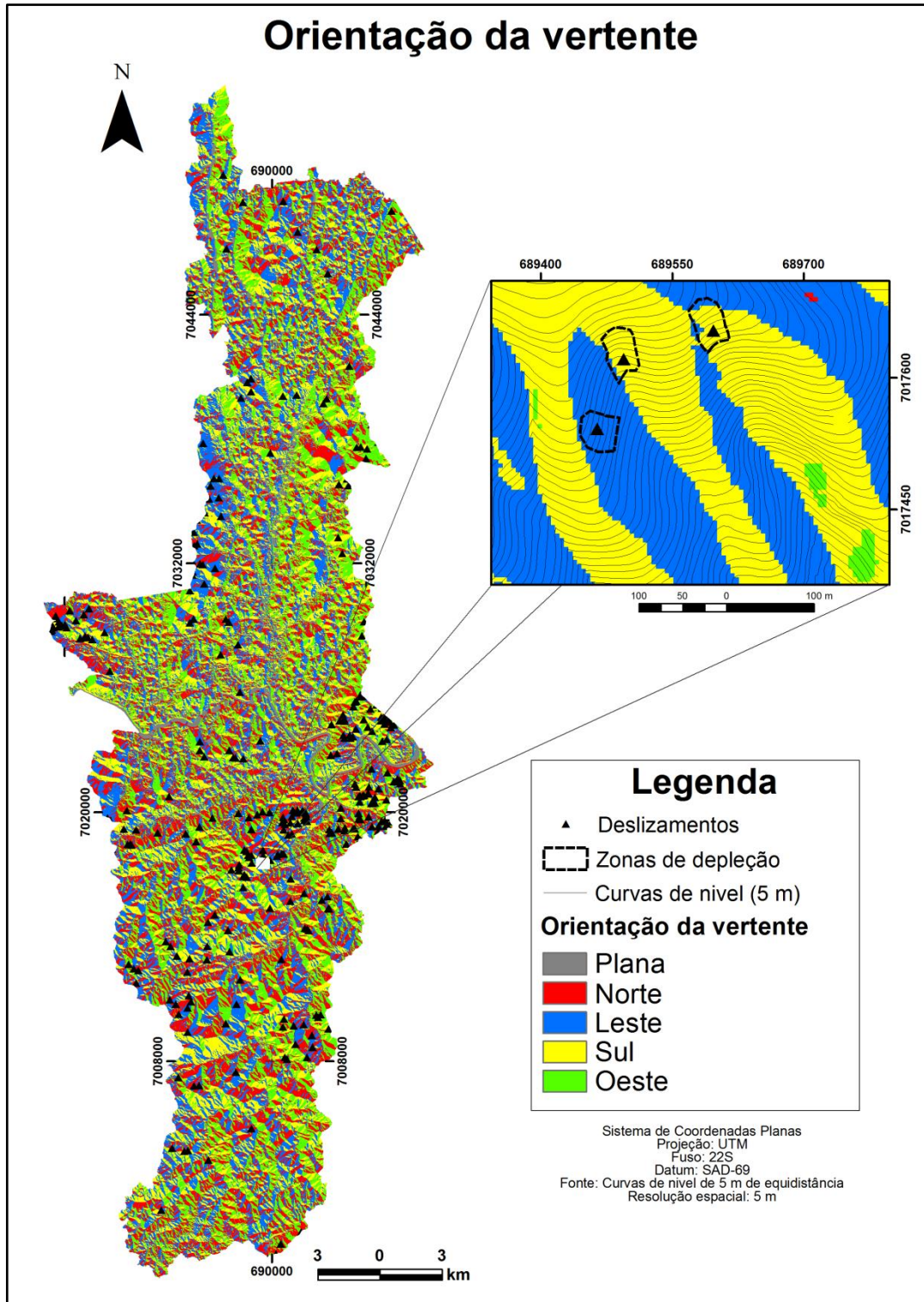
#### 3.2.1.2.2. *Orientação das vertentes*

A orientação das vertentes (também chamada exposição, direção ou aspecto) é definida pelo ângulo horizontal da direção esperada do escoamento superficial em relação ao Norte geográfico (Valeriano, 2008).

Esta evidência apresenta-se como potencial indicador de favorabilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais à medida que pode traduzir, de maneira indireta, os efeitos sobre a estabilidade das encostas de fatores relacionados à atuação dos teores de umidade antecedente do solo bem como daqueles resultantes de descontinuidades (Magalhães & Cella 1998, Moore et al. 1993, Qiu et al. 2001, Romano & Palladino 2002, Soares et al. 2002, Abnee et al. 2004, Coelho 2010, Geroy et al. 2011, Baum & Godt 2010, Hawke & McConchie 2011).

Compreende um dado quantitativo cíclico e a análise da associação espacial entre os deslizamentos (“*training points*”) e a orientação das vertentes, foi conduzida através do método categórico de ponderação, conforme sugerido por Bonham-Carter (1994). Para tanto, os valores foram reclassificados em intervalos através do estabelecimento de quatro faixas (quadrantes) de valores azimutais do ângulo horizontal da direção esperada do escoamento superficial. Os quadrantes Norte (NW-NE), Leste (EN-ES), Sul (SE-SW) e Oeste (WS-WN) foram definidos adotando como critério os intervalos de  $315^{\circ}$  a  $45^{\circ}$ , de  $45^{\circ}$  a  $135^{\circ}$ , de  $135^{\circ}$  a  $225^{\circ}$  e de  $225^{\circ}$  a  $315^{\circ}$  respectivamente.

A Figura 3.2 apresenta o mapa de orientação das vertentes da área de estudo e, em detalhe, um recorte da área em escala aproximada de 1:2.000, ilustrando a distribuição de classes de orientação, de zonas de depleção de deslizamentos translacionais e os seus respectivos pontos de treinamento.



**Figura 3.2** – Orientação das vertentes elaborada a partir do MDT com resolução de 5 m. Onde, Norte: 315° a 45°; Leste: 45° a 135°; Sul: 135° a 225° e; Oeste: 225° a 315°.  
**Fonte:** Adaptado da base planialtimétrica da Prefeitura Municipal de Blumenau (AEROIMAGEM 2003).

### 3.2.1.2.3. *Curvatura horizontal*

A curvatura da superfície compreende a segunda derivação topográfica realizada a partir do MDT, e pode ser expressa em curvatura vertical (na direção da declividade) e curvatura horizontal (ao longo da curva de nível) (Valeriano & Carvalho Júnior 2003).

A curvatura horizontal refere-se ao caráter divergente/convergente dos fluxos de matéria sobre o terreno, quando analisado em projeção horizontal (Valeriano 2008). Exerce influência sobre a intensidade de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície, regulando o balanço hídrico e o equilíbrio entre processos de pedogênese e morfogênese (Summerfield 1991, Neuhäuser & Terhorst 2007, Valeriano 2008, Regmi et al. 2010, Ozdemir 2011, Silveira et al. 2013).

Compreende um dado quantitativo de razão e a análise de favorabilidade foi conduzida através do método categórico de ponderação, conforme sugerido por Bonham-Carter (1994). A definição dos intervalos de classes (divergente, plana e convergente) foi realizada através da adoção de limiares arbitrários, através da apreciação visual, conforme sugerido por Valeriano (2008). Foram utilizados valores superiores a 0,05 rad/100m para representar segmentos divergentes, inferiores a -0,05 rad/100m para representar os segmentos convergentes e, de -0,05 a 0,05 rad/100m para designar os segmentos planos.

A Figura 3.3 apresenta o mapa de curvatura horizontal reclassificada da área de estudo e, em detalhe, um recorte da área em escala aproximada de 1:2.000, ilustrando a distribuição de classes de curvatura horizontal, de zonas de depleção de deslizamentos translacionais e os seus respectivos pontos de treinamento.

### 3.2.1.2.4. *Curvatura vertical*

A curvatura vertical refere-se à conformação convexo/côncavo do terreno e é percebida através da variação da declividade longitudinal enquanto se percorre a vertente, ou pela aproximação e afastamento das curvas de nível (Valeriano 2008). A ação da curvatura vertical sobre os processos de dinâmica das vertentes decorre da combinação dos efeitos da declividade e do comprimento de rampa, sugerindo tratar-se de uma variável dependente (Valeriano 2008).

Da mesma forma que para a curvatura horizontal, compreende um dado quantitativo de razão e a análise de favorabilidade foi conduzida através do método categórico de ponderação, conforme sugerido por Bonham-Carter (1994). A definição dos intervalos de classes (convexo, retilíneo e côncavo) foi realizada através da adoção de limiares arbitrários, através da apreciação visual, conforme sugerido por Valeriano (2008). Foram utilizados valores superiores a 0,05 rad/100m para representar segmentos convexos, inferiores a -0,05 rad/100m para representar os segmentos côncavos e, de -0,05 a 0,05 rad/100m para designar os segmentos retilíneos.

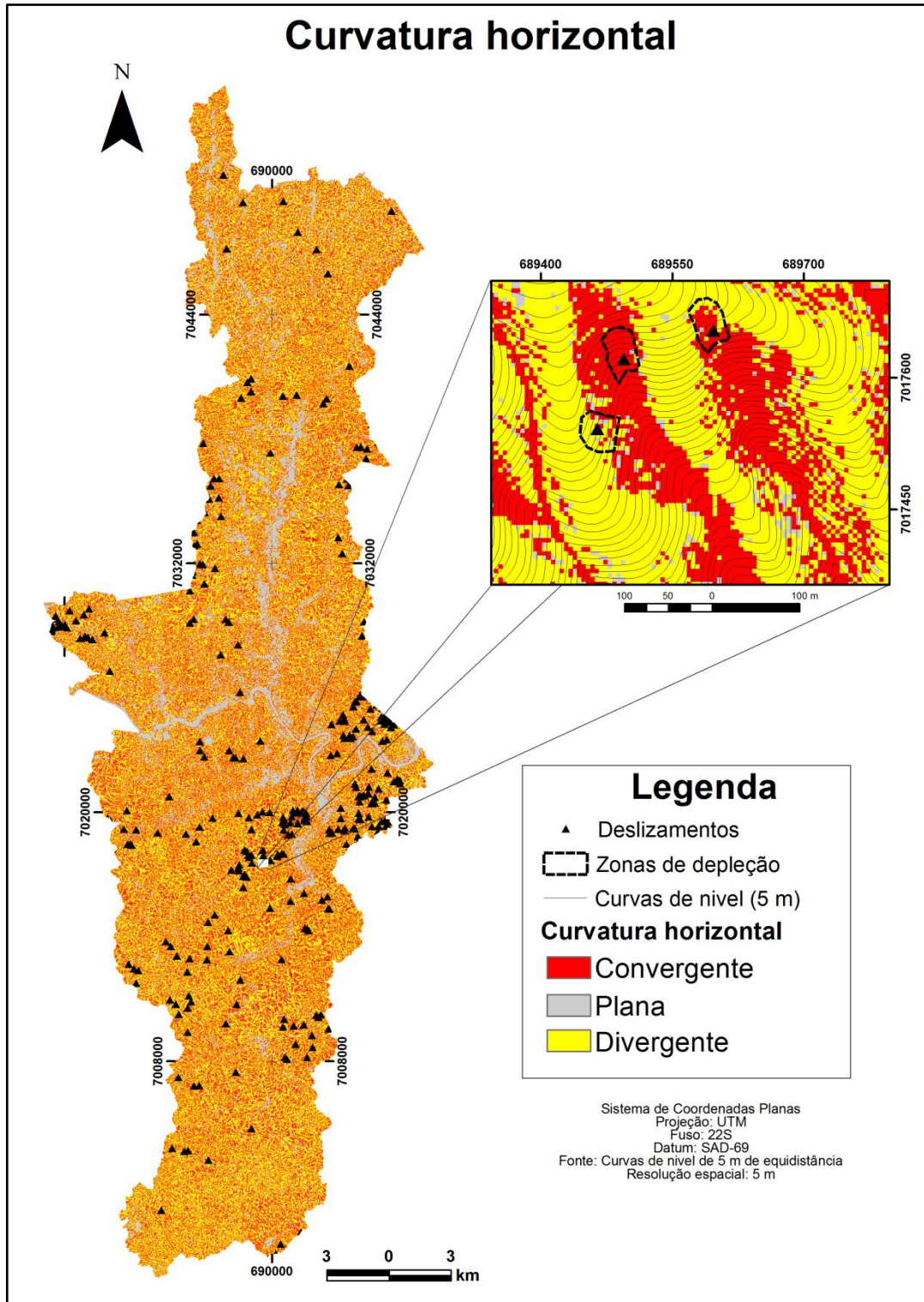
A Figura 3.4 apresenta o mapa de curvatura vertical reclassificada da área de estudo e, em detalhe, um recorte da área em escala aproximada de 1:2.000, ilustrando a distribuição de classes de curvatura vertical, de zonas de depleção de deslizamentos translacionais e os seus respectivos pontos de treinamento.

#### 3.2.1.2.5. *Declividade*

A declividade é o ângulo de inclinação da superfície local em relação ao plano horizontal (Valeriano 2008). Refere-se à relação entre a amplitude e o comprimento de rampa, podendo ser expressa em grau (declividade) ou percentagem (gradiente topográfico) (Moreira & Neto 1998). É a primeira derivada a partir do MDT, e sua importância se traduz em diferentes aspectos sobre os processos de dinâmica de vertentes, especialmente pela influência exercida sobre a intensidade dos processos de denudação (Moreira & Neto 1998, Valeriano 2008, Silveira 2010).

Compreende um dado quantitativo cíclico e a análise de favorabilidade foi conduzida através do método categórico de ponderação, conforme sugerido por Bonham-Carter (1994). As classes de declividade foram estabelecidas utilizando intervalos regulares de 5° até o valor de 75°. Os valores iguais ou superiores a 75° foram agrupados em classe única. Dessa forma, foram definidas 11 classes de valores de inclinação.

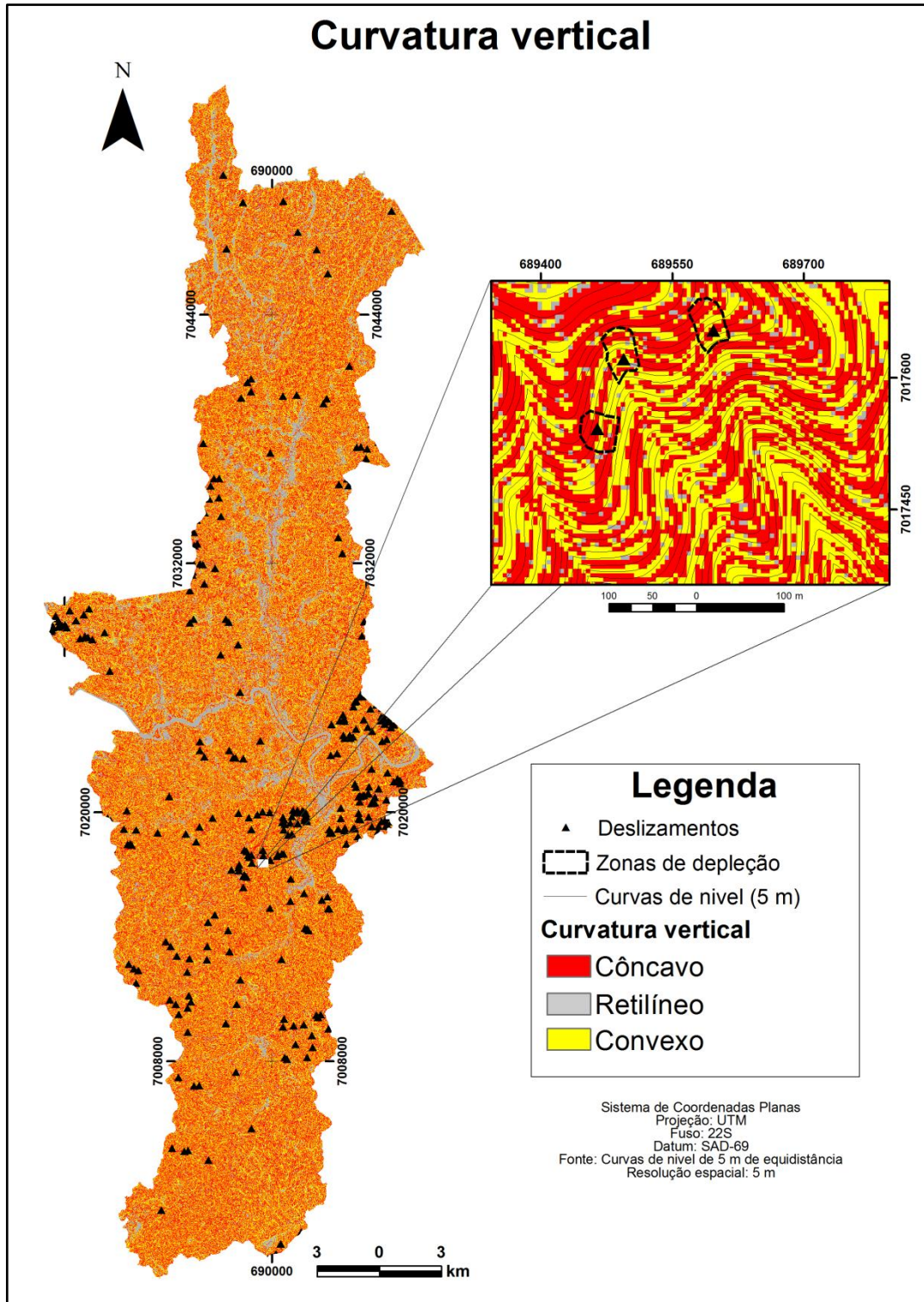
A Figura 3.5 apresenta o mapa de declividade da área de estudo e, em detalhe, um recorte da área em escala aproximada de 1:2.000, ilustrando a distribuição de classes de declividade, de zonas de depleção de deslizamentos translacionais e os seus respectivos pontos de treinamento.



**Figura 3.3** – Curvatura horizontal das vertentes da área de estudo elaborada a partir do MDT com resolução de 5m. Divergente:  $\geq 0,05$  rad/100m; Convergente:  $\leq -0,05$  rad/100m e; Plana: 0,05 a -0,05 rad/100m.

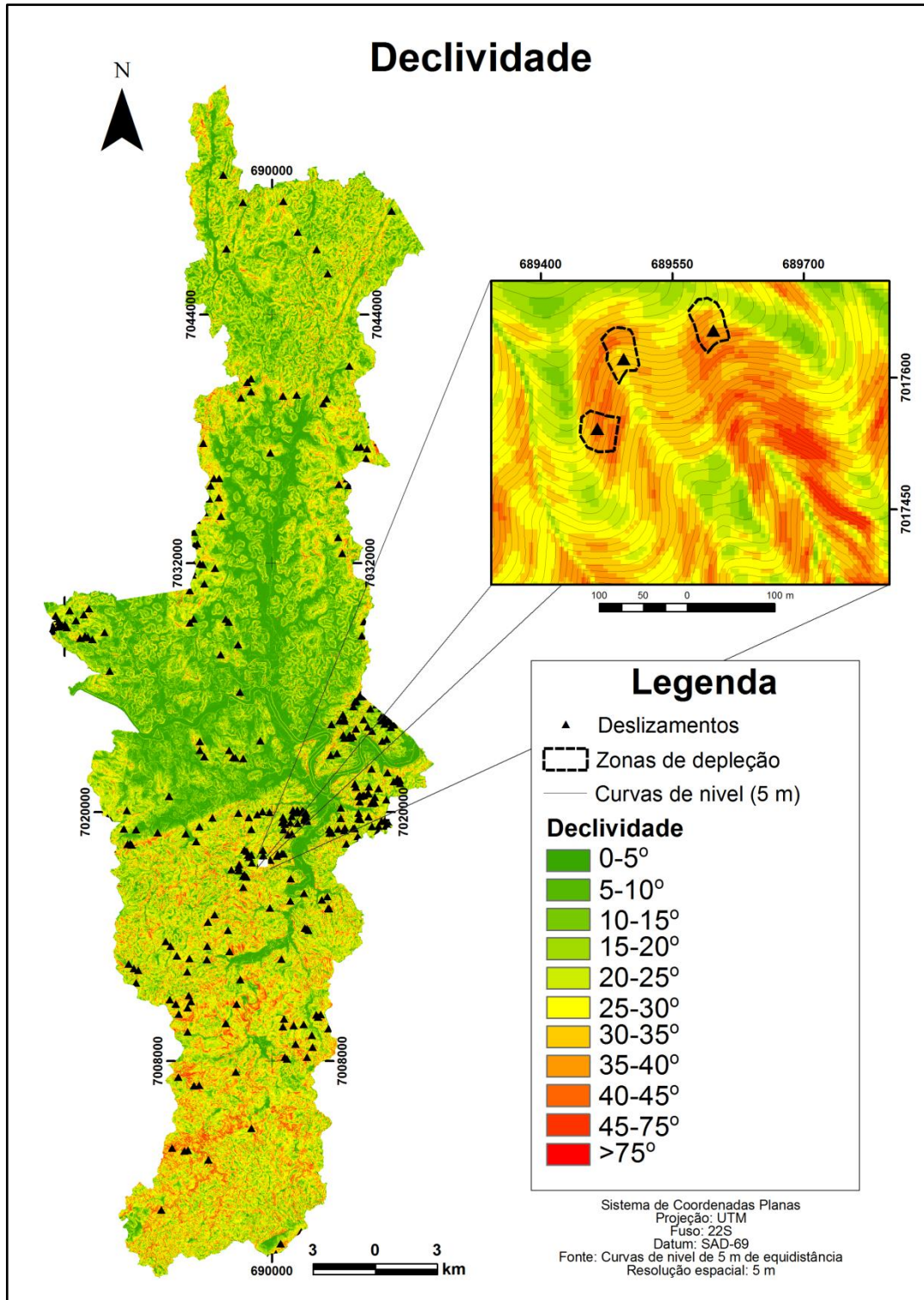
**Fonte:** Adaptado da base planialtimétrica da Prefeitura Municipal de Blumenau (AEROIMAGEM 2003).





**Figura 3.4** – Curvatura vertical das vertentes da área de estudo elaborada a partir do MDT com resolução de 5m. Convexo:  $\geq 0,05$  rad/100m; Côncavo:  $\leq -0,05$  rad/100m e; Retilínea: 0,05 a -0,05 rad/100m.

**Fonte:** Adaptado da base planialtimétrica da Prefeitura Municipal de Blumenau (AEROIMAGEM 2003).



**Figura 3.5** – Declividade da área de estudo elaborada a partir do MDT com resolução de 5m.

**Fonte:** Adaptado da base planialtimétrica da Prefeitura Municipal de Blumenau (AEROIMAGEM 2003).

### 3.2.1.3. Cobertura e uso do solo.

A cobertura vegetal poderá apresentar comportamentos diferenciados com relação à influência exercida sobre a estabilidade das encostas (Gray 1995).

A interceptação da água da chuva, a evapotranspiração, o aumento da rugosidade e do controle de processos erosivos, a obstrução e retenção de massas movimentadas, o reforço mecânico e a ancoragem exercida pelas raízes são exemplos de efeitos positivos associados à presença de vegetação florestal (Prandini et al. 1976, Tsukamoto & Kusakabe 1984, Sidle et al. 1985, Leventhal & Mostyn 1987, Mac Gregor & Manus 1992, Augusto-Filho 1994, Gray 1995, Cammeraat et al. 2007, Dupuy et al. 2007, Wu 2007, Tabalipa & Fiori 2008, Fiori & Carmignani 2009, Schwarz et al. 2010).

Por outro lado, o efeito alavanca (transmissão de força cisalhante resultante da ação do vento), o efeito cunha (quando as raízes provocam a abertura de fraturas entre blocos de rocha), a sobrecarga exercida pela força peso e o aumento da capacidade de infiltração da água no solo são relacionados como exemplos de efeitos negativos que a vegetação florestal pode exercer sobre terrenos inclinados (Gray & Leiser 1982, Greenway 1987, Morgan & Rickson 1995, Gray 1995, Augusto-Filho e Vergili 1998, Fiori & Carmignani 2009).

No presente trabalho, para a análise das relações espaciais entre os deslizamentos translacionais utilizados como modelos de evento e diferentes padrões de cobertura e uso do solo, foram utilizadas duas técnicas distintas de mapeamento, quais sejam, através da interpretação de imagens de satélite (designado como mapa de “Uso do Solo”) e através da determinação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

#### 3.2.1.3.1. Uso do Solo

A elaboração do mapa de uso do solo foi conduzida através da técnica de interpretação visual de imagens do satélite QUICKBIRD<sup>®</sup> relativas ao período de janeiro a junho de 2008.

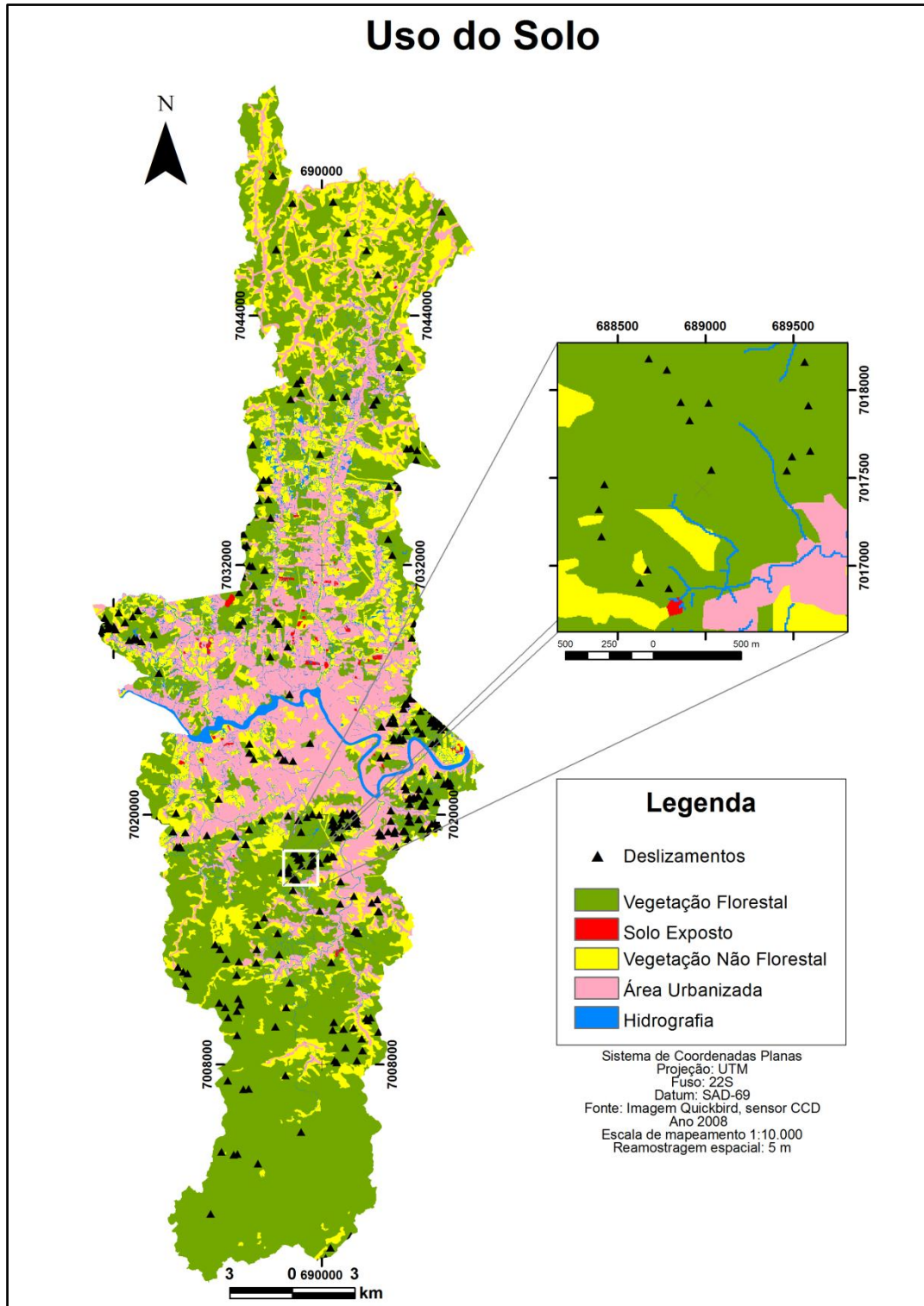
As imagens foram adquiridas pela Prefeitura Municipal de Blumenau através da empresa VisãoGeo. Trata-se de um produto já georreferenciado, constituído de 1 imagem *OrtoquickPac*, composta por 4 bandas multiespectrais (vermelho - R – 0,63 a 0,69  $\mu\text{m}$ , verde - G - 0,52 a 0,60  $\mu\text{m}$ , azul - B - 0,45 a 0,52  $\mu\text{m}$  e infravermelho

próximo - 0,76 a 0,90  $\mu\text{m}$ ), com resolução espacial de 2,4m, e 1 banda pancromática com resolução de 0,6 m e coeficientes polinomiais que permitem a ortoretificação da imagem, na resolução radiométrica de 8 bits. O processo de ortoretificação da imagem foi conduzido utilizando o Modelo Digital do Terreno (MDT) elaborado através da base planialtimétrica da área de estudo, com equidistância das curvas de 5 m, do levantamento aerofotogramétrico de 2003 (AEROIMAGEM 2003).

Os polígonos do mapa de uso do solo foram traçados na escala de visualização de 1:10.000. As composições coloridas foram utilizadas permitindo a separação visual das texturas de imagens relativas aos tipos de vegetação, solo exposto, corpos hídricos e as áreas ocupadas. O mapeamento foi validado através de observações de campo complementares. O programa ArcGIS 10.1 (ESRI®) foi utilizado para realizar todas as etapas do processo de edição do mapa de uso do solo.

Considerando os propósitos da presente pesquisa, a definição das classes de uso e cobertura do solo foi realizada através de uma adaptação da proposta de IBGE (2006), tendo sido delimitadas cinco classes, a saber:

- i. **Vegetação florestal:** formações arbóreas, compondo remanescentes florestais nativos e mapeáveis, compreendendo áreas maiores que 0,01 Km<sup>2</sup> aproximadamente, e identificadas através da textura da imagem correspondente ao efeito promovido pela contiguidade das copas das árvores;
- ii. **Vegetação não-florestal:** todo tipo de cobertura vegetal que não atende os critérios de enquadramento na classe anterior, envolvendo áreas de vegetação natural bem como coberturas vegetais resultantes de atividades antrópicas como lavoura, pastagens, silvicultura, etc.;
- iii. **Área urbanizada:** compreendendo as áreas de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário, onde predominam as superfícies artificiais não-agrícolas;
- iv. **Solo exposto:** compreendendo as situações envolvendo a exposição direta do solo, excluindo-se as estradas não pavimentadas que por sua vez foram inseridas na classe anterior e;
- v. **Hidrografia:** corpos hídricos superficiais, naturais e artificiais, disponíveis na base cartográfica do município de Blumenau.



**Figura 3.6** – Mapa de uso do solo do município de Blumenau, elaborado através da interpretação de imagem de Satélite Quickbird (sensor CCD, mosaico 2008), em escala 1:10.000, com reamostragem espacial para 5 m.

A despeito da variabilidade de situações dentro de cada uma das cinco classes elencadas, admite-se tratar das situações mapeáveis na escala utilizada, e que melhor representariam os diferentes comportamentos de estabilidade esperados

conforme as mudanças na configuração da superfície, sobretudo em razão das diferentes influências relacionadas à geometria do sistema e dos fluxos hídricos. Compreende um dado de natureza qualitativa nominal e, para a análise de favorabilidade, foi empregado o método categórico de ponderação.

A Figura 3.6 apresenta o mapa de uso do solo da área de estudo e, em detalhe, um recorte da área em escala aproximada de 1:25.000, ilustrando a distribuição das classes de uso do solo e pontos de treinamento que representam deslizamentos utilizados como modelo de evento.

### 3.2.1.3.2. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

Como forma de eliminar os efeitos da subjetividade no mapeamento do uso do solo através da interpretação visual, foi empregada a técnica de mapeamento da vegetação através da determinação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Trata-se de um índice de vegetação que permite expressar numericamente se o alvo observado contém vegetação verde com vida ou não. Seu princípio físico está baseado no fato de que plantas fotossinteticamente ativas absorvem radiação solar na região do vermelho ( $\approx 0.6 \mu m$ ) ao passo que refletem na região do infravermelho próximo ( $\approx 0.8 \mu m$ ) (Jensen 2009).

O NDVI representa a razão normalizada entre o fluxo radiante refletido no infravermelho próximo ( $\rho_{nir}$ ) e o fluxo radiante refletido no vermelho ( $\rho_{red}$ ), tornando possível distinguir a presença de vegetação verde com vida (Jensen 2009).

Conforme Rouse et al. (1974 *apud* Jensen 2009) o índice é definido pela seguinte fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

**NIR** = representa o fluxo radiante refletido no infravermelho próximo ( $\rho_{nir}$ ) e;

**R** = representa o fluxo radiante refletido no vermelho ( $\rho_{red}$ ).

A despeito da maior resolução espacial nominal, as imagens do satélite Quickbird foram preteridas para o cálculo do NDVI em razão das incertezas derivadas da quantidade de sombra observada. Para tanto, foram utilizados os dados do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat 5 (bandas TM3 e TM4), resolução de 30 m. As imagens georreferenciadas e corrigidas ao nível L1T, e com

data de setembro 2006, foram acessadas via FTP do GLCF (2012). A escolha dessas imagens levou em consideração o fato de compreender cenas anteriores ao ano de 2008, com cobertura de nuvens visualmente não perceptível, e em escala compatível.

A banda TM 3 (0,63 – 0,69  $\mu m$ ) representa o fluxo radiante refletido no vermelho. Neste caso, a vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas) com vegetação, e também entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: vegetação florestal e não-florestal) (INPE 2013).

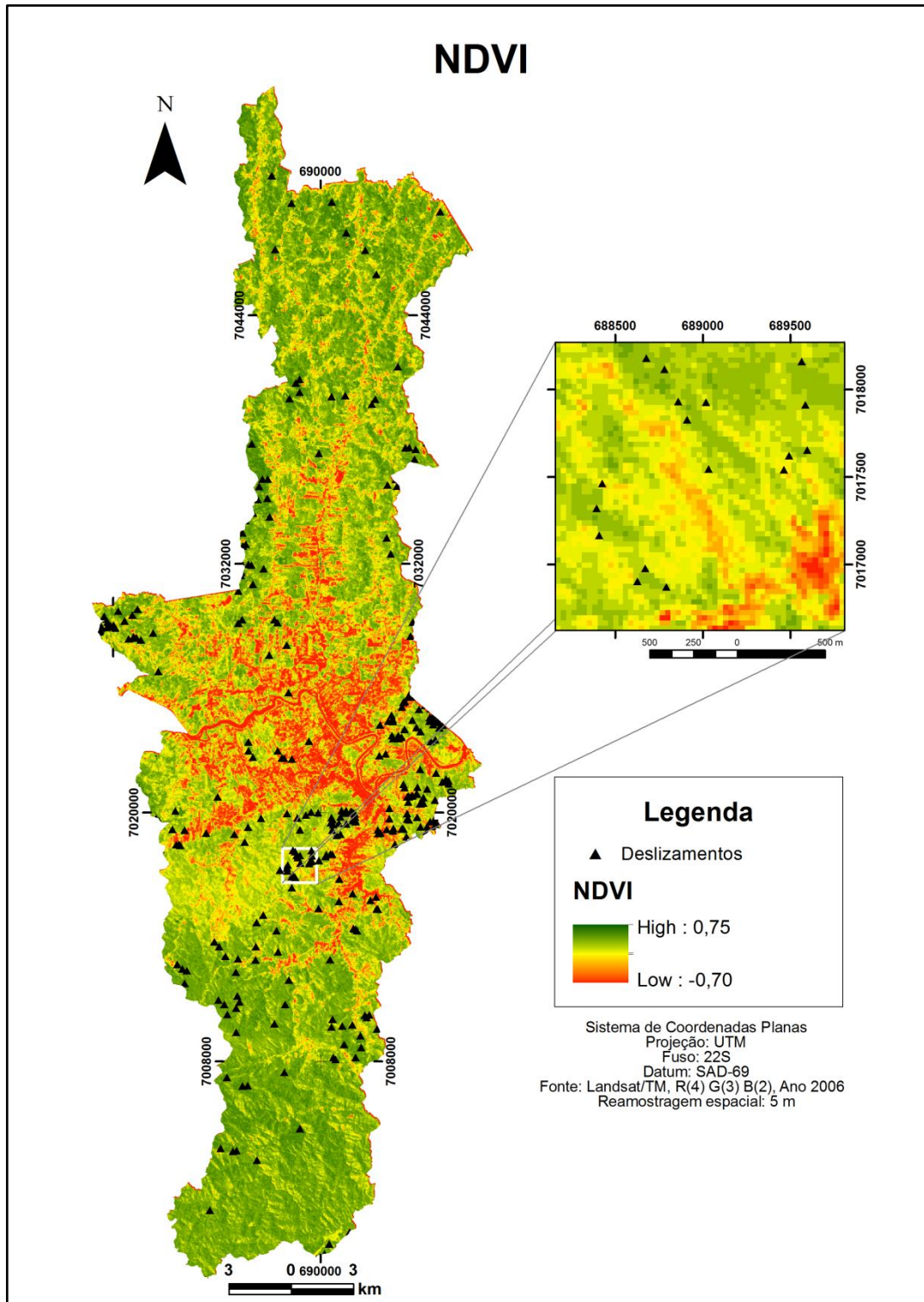
A banda TM 4 (0,76 – 0,90  $\mu m$ ) representa o fluxo radiante refletido no infravermelho próximo. Neste segmento do espectro, os corpos de água absorvem muita energia e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, ao contrário, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens (INPE 2013).

Para o cálculo do NDVI, inicialmente as bandas do vermelho e do infravermelho próximo foram transformadas em imagens de reflectância de superfície. A partir das imagens de reflectância de cada banda, calculou-se o NDVI. O programa ENVI 4.6 (*Exelis®*) foi utilizado para realizar todas as etapas do processo de determinação do NDVI.

Os valores de NDVI podem variar de -1,0 a +1,0 (Jensen, 2009). Por definição matemática, o NDVI de uma área contendo vegetação densa, típica de formações florestais temperadas e tropicais, deverá apresentar valores positivos altos entre 0,5 e 1,0. Cobertura vegetal não florestal, herbáceo-arbustiva, por exemplo, deverá apresentar valores positivos mais baixos, em torno de 0,2 e 0,5, enquanto que solos expostos possuem valores ainda mais baixos entre 0,1 e 0,2, podendo alcançar valores negativos dependendo do tipo de solo. No caso de corpos de água e edificações, o NDVI apresenta valores negativos (INPE 2013).

A evidência está representada na área de estudo por 29 classes, organizadas em intervalos de 0,05, com valores que variaram de -0,70 a 0,75. Compreende, portanto, um dado de natureza quantitativa de razão e, para a análise de favorabilidade, foi empregado o método categórico de ponderação.

A Figura 3.7 apresenta o mapa do NDVI da área de estudo e, em detalhe, um recorte da área em escala aproximada de 1:25.000, ilustrando a distribuição das classes de uso do solo e pontos de treinamento que representam deslizamentos utilizados como modelo de evento.



**Figura 3.7** – Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do município de Blumenau, elaborado a partir de imagem do Satélite Landsat 5 (sensor TM, mosaico 2006), com resolução espacial de 30 m e reamostragem para 5 m.



### **3.2.2. Inventário das cicatrizes de deslizamento e definição dos pontos de treinamento**

A definição dos pontos de treinamento contou com a triagem e complementação do banco de dados da Diretoria de Geologia, Análise e Riscos Naturais da Prefeitura Municipal Blumenau (BLUMENAU, 2012b). O inventário das cicatrizes de deslizamento foi conduzido através de levantamentos de campo apoiados pela interpretação visual de imagens de satélite (QUICKBIRD<sup>®</sup>, mosaico de 2008 e de 2009, resolução espacial de 60 cm).

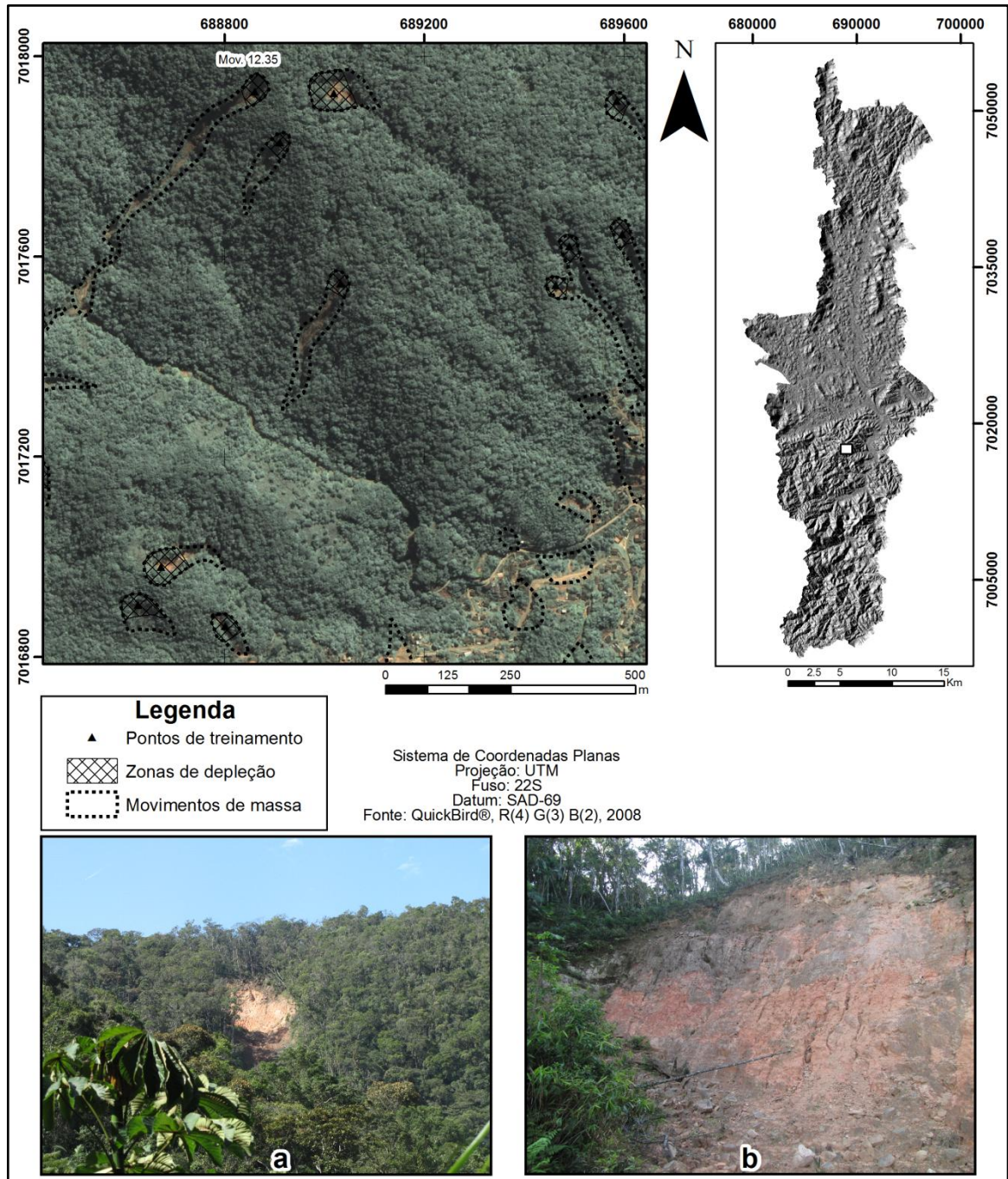
Tendo em vista limitações de natureza prática, a definição dos deslizamentos que serviram de referência para a condução das análises considerou os movimentos gravitacionais de massa, representando superfícies de rupturas posicionadas em diferentes profundidades do regolito, cujas superfícies de ruptura variam desde planares a até situações de maior complexidade, com a intersecção de mais de um plano (em cunha), e feições resultantes nas cicatrizes que sugerem dinâmica translacional de deslocamento, conforme definição revisada por Dikau (2004) sem, no entanto, distinguir os mecanismos de instabilização atuantes.

Os critérios adotados para a distinção entre as diferentes partes dos movimentos foram adaptados da proposta de Highland & Bobrowsky (2008), distinguindo-se as zonas de depleção e as zonas de dejeção. Desta forma, as zonas de depleção foram reconhecidas a partir da identificação da área onde se processa o desprendimento do material, supostamente delimitada pela abrangência da superfície de ruptura, que por sua vez estabelece o limite inferior do material deslocado. As zonas de dejeção foram reconhecidas a partir da identificação da porção do terreno onde se completa o deslocamento e acúmulo do material mobilizado.

A Figura 3.8 ilustra, para um recorte da área de estudo, os elementos mapeados no inventário dos movimentos de massa. As etapas de fotointerpretação e edição dos polígonos relativos às cicatrizes foram realizadas no aplicativo ArcGIS 10.1 (ESRI<sup>®</sup>).

Para cada cicatriz considerada, foram traçados os polígonos relativos a toda a área diretamente afetada pelo movimento, distinguindo-se a zona de depleção e a área de dejeção. A partir de então, foi definido um ponto de treinamento, correspondente ao centróide da área considerada como a zona de depleção, em

concordância com a abordagem adotada por Poli & Sterlachini (2007), Neuhauser & Terhorst (2007), Dahal et al. (2008) e Pereira et al. (2012).



**Figura 3.8** – Ilustração dos elementos mapeados durante o processo de inventário dos movimentos de massa. (a) Vista panorâmica e (b) na cicatriz do deslizamento 12.35, que compreende uma ruptura planar no contato entre um dique de riolito e arenitos da Formação Ribeirão Carvalho.

**Fonte:** Adaptado da base de dados da Prefeitura Municipal de Blumenau (BLUMENAU 2012b).

De um total de 860 movimentos gravitacionais de massa de médio a grande porte mapeados na área de estudo, foram selecionados 294 como pontos de

treinamento para as análises de favorabilidade. Apenas os eventos que supostamente expressariam suscetibilidade natural foram considerados na análise, distinguindo-se daqueles típicos de talude de corte ou aterro (566 eventos), e que, portanto, representariam as situações de suscetibilidade induzida.

As zonas de depleção dos 294 deslizamentos translacionais utilizados como referência, abrange uma área total aproximada de 0,76 Km<sup>2</sup> (761.375 m<sup>2</sup>) o que, segundo a resolução espacial adotada, corresponde a 30.455 unidades de área (*pixels*). O tamanho médio das zonas de depleção é de 0,003 Km<sup>2</sup> (2.589,7 m<sup>2</sup>), sendo que a menor apresenta área de 203 m<sup>2</sup> e a maior de 19.010 m<sup>2</sup>.

### 3.2.3. A técnica de análise espacial pesos de evidência

No presente trabalho foi utilizada a técnica de modelagem espacial pesos de evidência (*WofE - Weights of Evidence*) (Bonham-Carter et al. 1989, Bonham-Carter 1994). A técnica possibilita gerar estimativas objetivas dos valores que refletem as melhores associações espaciais entre as evidências (fatores condicionantes) e o evento conhecido. Os valores, neste caso, representam a probabilidade de ocorrer um evento, dada a presença de um condicionante (Bonham-Carter 1994).

As etapas envolvidas para a análise de suscetibilidade através da aplicação da técnica pesos de evidência podem ser sintetizadas da seguinte maneira: i) Preparação dos mapas temáticos das evidências potencialmente úteis para a previsão dos locais favoráveis a ocorrência de deslizamentos com dinâmica translacional; ii) Seleção e definição dos pontos de treinamento obtidos através do inventário das cicatrizes de deslizamentos; iii) Determinação da probabilidade *a priori*; iv) Determinação dos ponderadores bayesianos ( $W^+$  e  $W^-$ ) de cada tema/evidência, tendo em vista as relações de frequências observadas entre a evidência e a cicatriz do deslizamento, fase esta também denominada como estimativa de favorabilidade; v) Reclassificação binária, maximizando a associação espacial mediante a seleção das classes favoráveis através do cálculo do Contraste (C) e do valor de Confiança (*Studentized Contrast* – S(C)) ; vi) Integração dos mapas binários e determinação da probabilidade *a posteriori*; vii) Aplicação de testes estatísticos para avaliar a condição de independência dos planos de informação entre si, e identificação do melhor esquema de combinação entre os temas selecionados; viii) Realização dos testes de validação dos modelos preditivos

gerados, através da análise de eficiência de classificação; ix) Seleção e definição do melhor modelo e elaboração da carta de suscetibilidade.

Um dos principais conceitos que norteiam a abordagem bayesiana é o das probabilidades *a priori* e *posteriori* (Bonham-Carter 1994). A probabilidade *a priori* assume que todos os eventos elementares são igualmente prováveis em uma determinada área. Contudo, ela pode ser modificada, desde que a ocorrência do evento possa ser condicionada por um determinado fator, ou pela ação combinada de vários fatores, de onde deriva o conceito da probabilidade condicional, ou *posteriori*.

A probabilidade de ocorrer o evento encontra-se designada pela letra “P”, o evento de deslizamento pela letra “E” e o espaço amostral pela letra “A”, assim:

$$P(E) = \frac{nE}{nA} \quad \text{Equação 3.2.5.1}$$

Onde “n” refere-se ao “número de elementos de”.

Desta notação depreende-se que os eventos elementares (E) são igualmente prováveis no espaço amostral, tendo-se assim a probabilidade *a priori*.

A partir da probabilidade *a priori*, define-se a chance *a priori*, que resulta da razão entre a probabilidade do evento ocorrer pela probabilidade do evento não ocorrer, sendo expressa pela seguinte notação:

$$O(E) = \frac{P(E)}{1 - P(E)} \quad \text{Equação 3.2.5.2}$$

A probabilidade de um evento pode ser modificada pela atuação de fatores condicionantes (evidências). Assim, a probabilidade de ocorrer um evento “E”, dado à presença de uma evidência “B” pode ser expressa pela notação da probabilidade condicional:

$$P(E|B) = \frac{P(E \cap B)}{P(B)} \quad \text{Equação 3.2.5.3}$$

Onde:

$P(E|B)$  representa a probabilidade condicional de ocorrer o evento E, dado a evidência B e;

$P(E \cap B)$  representa a área total ocupada por  $E$  e  $B$  ao mesmo tempo (área de intersecção entre ambos).

Uma expressão similar pode ser derivada quando um evento  $E$  está presente, porém a evidência está ausente  $\bar{B}$ , como demonstrado a seguir:

$$P(E|\bar{B}) = \frac{P(E \cap \bar{B})}{P(\bar{B})} \quad \text{Equação 3.2.5.4}$$

O mesmo princípio é válido para demonstrar o espaço ocupado pelas probabilidades do evento não ocorrer  $P(\bar{E})$  em relação à presença  $B$  ou ausência  $\bar{B}$  da evidência.

Assim, através do ajuste ao logaritmo natural das relações das probabilidades condicionais, obtêm-se os ponderadores de Bayes ( $W^+$  e  $W^-$ ), também chamados de pesos positivos ou negativos:

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{P(B|E)}{P(B|\bar{E})} \right\} \quad \text{Equação 3.2.5.5}$$

$$W^- = \ln \left\{ \frac{P(\bar{B}|E)}{P(\bar{B}|\bar{E})} \right\} \quad \text{Equação 3.2.5.6}$$

A chance *a posteriori* de o evento ocorrer ou não ocorrer é obtida então a partir da soma dos respectivos pesos ( $W^+$  ou  $W^-$ ) com o logaritmo natural da chance *a priori*:

$$\ln(E|B) = \ln \{O(E)\} + W^+ \quad \text{Equação 3.2.5.7}$$

$$\ln(E|\bar{B}) = \ln \{O(E)\} + W^- \quad \text{Equação 3.2.5.8}$$

Nas equações acima o termo  $\frac{P(B|E)}{P(B|\bar{E})}$  refere-se à razão de suficiência, e o termo  $\frac{P(\bar{B}|E)}{P(\bar{B}|\bar{E})}$  à razão de necessidade.

A favorabilidade representa uma avaliação quantitativa da expectativa de ocorrência de um evento e resulta da diferença entre as razões de suficiência e necessidade (Agterberg 1989, Rostirolla et al. 1998, Soares et al. 2002). Uma

evidência é mais necessária quanto mais ela está ausente onde o evento não ocorre. Por outro lado, é tanto mais suficiente quanto maior a proporção de ocorrência do evento em que ela está presente.

A necessidade é uma medida da veracidade da afirmação “se a evidência **B** é falsa, então a hipótese **E** não é verdade,” enquanto a suficiência mede a veracidade de “se **B** é verdade, então **E** também é verdade”. A condição de suficiência de uma evidência é satisfeita quando a probabilidade de ocorrência do deslizamento é aumentada com a existência da variável. A condição de necessidade da variável é satisfeita quando a probabilidade de não existência do evento é aumentada com a não existência da variável (Soares et al. 2002). Idealmente, irá ocorrer o deslizamento onde um conjunto de evidências diagnósticas apresentem os mais altos graus de necessidade e suficiência. O contraste (**C**) compreende o resultado da diferença entre os dois termos.

Na técnica pesos de evidência, os dados podem ser tratados através de dois métodos para a determinação dos pesos, quais sejam, o método categórico e o método cumulativo. No caso do método categórico os dados compreendem categorias não relacionadas e mutuamente exclusivas. O método cumulativo é empregado quando as informações são relacionadas (Boleneus et al. 2001; Magalhães 2012).

No presente capítulo, os procedimentos de cálculo dos ponderadores ( $W^+$  e  $W^-$ ) foram aplicados aos dados geológicos (unidades geológicas e distância de lineamentos negativos), geomorfológicos (orientação de vertentes, curvatura horizontal e vertical e declividade) e que representam os padrões de cobertura do solo (uso do solo e NDVI).

Para a identificação das evidências favoráveis, é necessária a aplicação de um indicador estatístico que possibilite contornar os efeitos das incertezas associadas à análise. Na técnica pesos de evidência, este indicador pode ser denominado como valor de confiança (“*Studentized Contrast*”), conforme proposto por Bonham-Carter (1994). É utilizado no processo de generalização dos mapas evidenciais, porque incorpora a avaliação das incertezas associadas ao mapeamento dos indicadores (evidências e pontos de treinamento/cicatriz de deslizamento), e onde os valores de **C** não apresentam um limite claro do valor máximo (Bonham-Carter 1994).

O valor de confiança refere-se ao produto da razão entre o contraste e o seu respectivo desvio padrão ( $C/s(C)$ ). O desvio padrão do contraste é obtido a partir da soma dos valores do desvio padrão dos pesos:

$$s(C) = s(W^+) + s(W^-) \quad \text{Equação 3.2.5.8}$$

O desvio padrão dos pesos resulta da raiz quadrada das respectivas variâncias, e podem ser obtidas a partir da seguinte notação proposta por Bishop et al. (1975 apud Bonham-Carter 1994):

$$s^2(W^+) = \frac{1}{N\{E \cap B\}} + \frac{1}{N\{E \cap \bar{B}\}} \quad \text{Equação 3.2.5.9}$$

$$s^2(W^-) = \frac{1}{N\{\bar{E} \cap B\}} + \frac{1}{N\{\bar{E} \cap \bar{B}\}} \quad \text{Equação 3.2.5.10}$$

Para os dados que foram analisados através do método categórico de ponderação, a identificação das classes favoráveis foi realizada considerando os valores de confiança ( $C/s(C)$ )  $\geq 1$  como critério de seleção, conforme Magalhães (2012). No caso dos dados relativos às faixas de distâncias de lineamentos, tratados pelo método cumulativo ascendente, o limite de corte foi estabelecido através do valor máximo de contraste.

Desde que atendam os requisitos de independência condicional, pesos de diferentes temas favoráveis podem ser somados para compor a chance ou probabilidade *a posteriori*, através de uma operação controlada espacialmente pela presença ou ausência da classe favorável de cada evidência. Assim, segundo Araújo (2004), se um determinado ponto (unidade de área) do mapa apresentar a evidência “i”, na soma o valor de  $W^+$  é computado, e no caso de a evidência estar ausente, então o valor de  $W^-$  é computado. A mesma operação é repetida para todas as evidências naquele ponto até que todas elas tenham sido computadas.

O valor final para cada unidade de área é dado pela somatória condicional dos valores de  $W^+$  e  $W^-$  adicionados do valor da probabilidade *a priori*. O processo é então repetido para todas as unidades de área, e conforme sugerido por Regmi et al. (2010), pode ser expresso pelo seguinte algoritmo:

$$O(E|B_1 \cap B_2 KB_n) = \ln \{O(E)\} + \sum_{i=1}^n \{(\mu_i = \textit{favorável})? W_i^+ : W_i^-\} \quad \text{Equação 3.2.5.11}$$

A definição do tamanho da unidade de área para a análise de favorabilidade obedeceu a resolução espacial derivada da base planialtimétrica utilizada, ou seja, 0,000025 km<sup>2</sup> (25 m<sup>2</sup>) e, como função da abordagem adotada de representação das zonas de depleção através do ponto centróide (294 pontos de treinamento) e do tamanho da área de estudo (20.836.777 unidades amostrais), o valor obtido para a probabilidade *a priori* foi de 0,000014.

A partir da análise de favorabilidade foram gerados 19 modelos de integração dos pesos das classes favoráveis, simulando diferentes combinações entre os temas de evidência, com vistas a determinação da probabilidade *a posteriori*, e identificação do resultado que melhor atendesse aos requisitos de independência dos dados aliado ao melhor ajuste de eficiência de classificação.

A técnica de modelagem espacial pesos de evidência adota como premissa que os dados utilizados não apresentem alto grau de dependência entre si (Bonham-Carter 1994; Agterberg & Cheng 2002). Dessa forma, a geração de modelos confiáveis fica condicionada à aplicação de testes para avaliar o grau de independência entre as evidências, nos locais relativos aos pontos de treinamento.

Foram empregados dois testes de análise global da dependência espacial dos temas utilizados, a saber, o teste da Razão de Independência Condicional (CIR – *Conditional Independence Ratio*) (Bonham-Carter 1994) e o Teste de Agterberg & Cheng (2002) (ACCIT – *Agterberg & Cheng Conditional Independence Test*).

A razão de independência condicional (*CIR - Conditional Independence Ratio*) é obtida do produto da relação entre o número de pontos de treinamento utilizados (*n*) e a soma de todos os valores da probabilidade *a posteriori* (*T*). Valores abaixo de 1 indicam uma condição de dependência entre os dados de entrada, sendo considerados aceitáveis os modelos com CIR acima de 0,85 (Bonham-Carter 1994).

Por outro lado, Agterberg & Cheng (2002) destacam que o princípio da independência condicional entre todos os temas de evidências implica que a soma das probabilidades posteriores (*T*) resulte em valor igual ao número total dos eventos utilizados como referência (*n*). Contudo, conforme frisado pelos autores, em



aplicações práticas  $T$  geralmente excede o número de  $n$ , e a diferença entre ambos tende a aumentar na medida em que valores de novos temas são adicionados, indicando uma possível violação do princípio de independência. O método *Agterberg & Cheng Conditional Independence*, por sua vez, trabalha com a hipótese de que a diferença  $T-n$  é nula, sugerindo um teste unicaudal para confirmar se  $T - n$  é significativamente maior que zero.

A normalidade de  $T$  pode ser assumida se o desvio padrão de  $T$  for significativamente menor do que  $T$ . Assim, para aceitar a hipótese de independência, Agterberg & Cheng (2002) propõem que a diferença  $T-n$  deva ser menor que o resultado da multiplicação entre o valor do escore  $z$  e o  $s(T)$ . Onde  $s(T)$  representa o desvio padrão de  $T$ .

No presente trabalho, o teste da hipótese de independência foi conduzido adotando-se um intervalo de confiança de 98% de probabilidade ( $z = 2,33$ ). Assim, o maior valor do indicador “ACCIT” foi utilizado como critério de escolha do modelo que melhor atende aos requisitos de independência, que por sua vez, pode ser expresso da seguinte forma:

$$\text{ACCIT} = \{2,33 \cdot s(T)\} - (T - n) \quad \text{Equação 3.2.5.12}$$

A avaliação da qualidade de ajuste dos modelos com relação à eficiência de classificação e de predição foi conduzida através da análise da curva da taxa de sucesso (SRC – *Success Rate Curve*), utilizando como referência o valor da área sob a curva (AUC – *Area Under Curve*) para aferir o ajuste do modelo.

Para a análise de eficiência de classificação foram considerados todos os 294 pontos de treinamento, enquanto que, para a análise da eficiência de predição, foi utilizada como referência a área total das zonas de depleção que, por sua vez, compreende 30.679 unidades de área.

A curva da taxa de sucesso (SRC) representa o percentual acumulado de deslizamentos ou unidades de área classificados corretamente no eixo  $y$ , e o percentual acumulado da área total no eixo  $x$ , partindo do maior para o menor valor de probabilidade *a posteriori* (Chung & Fabbri 2003, Fratinni et al. 2010).

A partir dos valores da curva SRC, os valores de AUC foram calculados através da seguinte formulação, conforme sugerido por Sawatzky et al. (2007):

$$AUC = \sum A_{i,j-1} \quad \text{Equação 3.2.5.13}$$

Onde,

$$A_{i,j-1} = \{0,5 \cdot (x_i - x_{i-1}) \cdot (y_i + y_{i-1})\} \quad \text{Equação 3.2.5.14}$$

Os modelos que atenderam os requisitos de independência condicional e apresentaram razoáveis indicadores de eficiência de classificação e predição, foram reclassificados, resultando em quatro classes que representam diferentes níveis de suscetibilidade a deslizamentos, quais sejam, baixa, média, alta e muito alta suscetibilidade. O limite estabelecido para a definição da classe média suscetibilidade foi o valor da probabilidade *a priori* (0,000014), e para o das demais classes, através de avaliação visual, foram considerados os pontos significativos de inflexão na curva de distribuição dos valores de probabilidade *a posteriori* (*CAPP Curve*) em relação à proporção da área acumulada, conforme sugerido por Sawatzky et al. (2007).

O aplicativo *Arc-Spatial Data Modeller* (ArcSDM), versão 4 (Sawatzky et al. 2007), que opera como extensão livre na plataforma ArcGIS 9.2 (ESRI®), foi utilizado para realizar todas as etapas do processo de análise espacial.

Maior detalhamento a respeito da técnica de modelagem espacial pesos de evidência e sua aplicação na predição de áreas favoráveis à ocorrência mineral pode ser consultado em Bonham-Carter et al. (1989), Agterberg et al. (1990), Bonham-Carter (1994) e Magalhães (2012). Araújo (2004) apresenta um detalhamento da aplicação da técnica pesos de evidência para a análise de suscetibilidade a deslizamentos, em um estudo de caso no município de São Sebastião (SP).

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da Tabela 3.1 é possível visualizar as relações espaciais entre os deslizamentos translacionais utilizados como pontos de treinamento e as classes da evidência unidade geológica.

Dentre as unidades geológicas consideradas, em 14 delas foi registrada a ocorrência de deslizamentos (Tabela 3.1). Conforme ilustrado na Figura 3.9, as três unidades que apresentaram a maior proporção de deslizamentos foram a Formação Ribeirão Carvalho (30,3%), Gnaisses Granulíticos Luis Alves (27,9%) e a unidade siltico-arenosa da Formação Gaspar (13,9%).

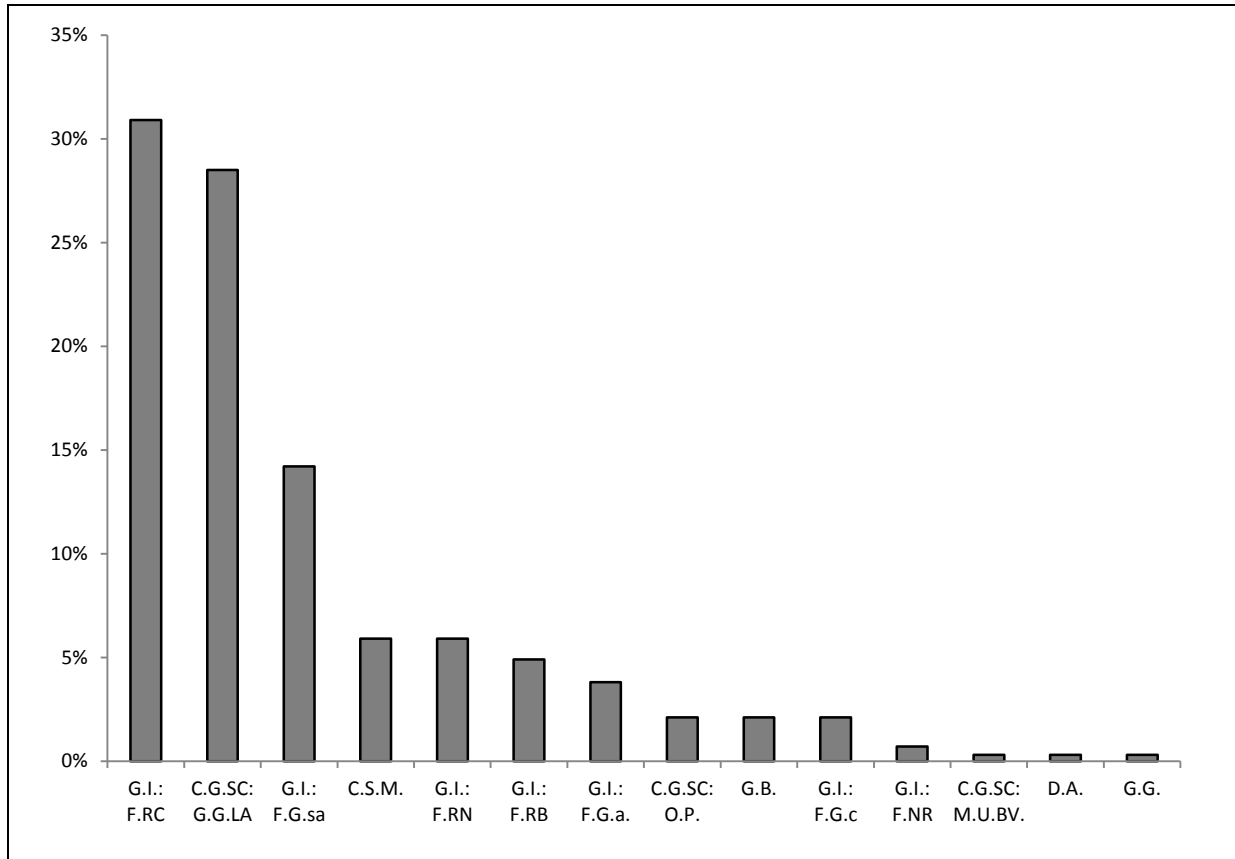
**Tabela 3.1** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais para as unidades geológicas representadas no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^+$	$s(W^+)$	$W^-$	$s(W^-)$	C	$s(C)$	$C/s(C)$
<i>Complexo Granulítico: Gnaisses Granulíticos Luis Alves</i>	204,88	39,33	82	27,9	-0,34	0,11	0,17	0,07	-0,52	0,13	-3,97
<i>Complexo Granulítico: Ortognaisse Pomerode</i>	41,20	7,91	6	2,0	-1,35	0,41	0,06	0,06	-1,42	0,41	-3,43
<i>Complexo Granulítico: Unidade Máfica-Ultramáfica Barra Velha</i>	3,34	0,64	1	0,3	-0,63	1,00	0,00	0,06	-0,64	1,00	-0,64
<i>Complexo São Miguel</i>	19,51	3,75	17	5,8	0,43	0,24	-0,02	0,06	0,46	0,25	1,82
<i>Diques ácidos</i>	0,09	0,02	1	0,3	2,93	1,00	0,00	0,06	2,93	1,00	2,93
<i>Diques básicos</i>	0,06	0,01	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Formação Gaspar: unidade arenosa</i>	5,16	0,99	11	3,7	1,33	0,30	-0,03	0,06	1,36	0,31	4,42
<i>Formação Gaspar: unidade conglomerática</i>	2,53	0,49	6	2,0	1,44	0,41	-0,02	0,06	1,45	0,41	3,52
<i>Formação Gaspar: unidade siltico-arenosa</i>	12,84	2,47	41	13,9	1,73	0,16	-0,13	0,06	1,86	0,17	11,04
<i>Formação Nova Rússia</i>	12,76	2,45	2	0,7	-1,28	0,71	0,02	0,06	-1,30	0,71	-1,83
<i>Formação Nova Rússia: unidade conglomerática</i>	0,75	0,14	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Formação Ribeirão Carvalho</i>	43,90	8,43	89	30,3	1,28	0,11	-0,27	0,07	1,55	0,13	12,22
<i>Formação Ribeirão do Bode</i>	28,45	5,46	14	4,8	-0,14	0,27	0,01	0,06	-0,14	0,27	-0,53
<i>Formação Ribeirão Neisse</i>	21,65	4,16	17	5,8	0,33	0,24	-0,02	0,06	0,35	0,25	1,39
<i>Granito Faxinal</i>	1,91	0,37	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Granito Guabiruba</i>	1,41	0,27	1	0,3	0,23	1,00	0,00	0,06	0,23	1,00	0,23
<i>Grupo Brusque</i>	57,74	11,08	6	2,0	-1,69	0,41	0,10	0,06	-1,79	0,41	-4,34
<i>Aluvião</i>	58,01	11,14	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Rio Itajaí-açu</i>	4,71	0,90	0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Onde:  $W^+$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^+)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W^-$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W^-)$  = desvio padrão do peso negativo; C = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.

Contudo, apenas 07 unidades atenderam os requisitos de favorabilidade e, dentre elas, a unidade representada por Diques ácidos, foi a que apresentou o maior valor de suficiência. Apenas um ponto de treinamento intersecta esta unidade que,

por sua vez, apresenta área cartografada de abrangência de apenas 0,1 km<sup>2</sup> (0,02% da área total), justificando a discrepância observada nos pesos obtidos.



**Figura 3.9** – Distribuição da frequência de deslizamentos em relação às unidades geológicas que apresentaram registro de ocorrência do evento. G.I. - Grupo Itajaí; C.G.SC: Complexo Granulítico de Santa Catarina; G.I.: F.RC – Formação Ribeirão Carvalho; C.G.SC: G.G.LA – Gnaisses Granulíticos Luis Alves; G.I.:F.G.sa –Formação Gaspar, unidade siltico-arenosa; C.S.M. – Complexo São Miguel; G.I.: F.RB – Formação Ribeirão do Bode; G.I.:F.G.a – Formação Gaspar unidade arenosa; C.G.SC: O.P.– Ortognaisse Pomerode; G.B. – Grupo Brusque; G.I.: F. NR. – Formação Nova Rússia; C.G.SC: M.U.BV. – Unidade Máfica-Ultramáfica Barra Velha; D.A. – Diques ácidos; G.G.: Granito Guabiruba.

É necessário reconhecer que as informações geológicas, até então disponíveis para a área de estudo, são insuficientes em representar a distribuição espacial de todos os demais corpos intrudidos, revelando a necessidade de complementação do mapeamento geológico (litológico e estrutural), em maior escala, permitindo melhor avaliar os efeitos de importantes discontinuidades litoestruturais na predisposição aos deslizamentos, bem como de seus efeitos decorrentes.

As demais unidades geológicas que apresentaram significativos contrastes positivos foram a Formação Gaspar, a Formação Ribeirão Carvalho, o Complexo São Miguel e a Formação Ribeirão Neisse (Tabela 3.1). A área somada destas 06

evidências compreende 20% do território e respondem por aproximadamente 60% dos deslizamentos utilizados no modelo, merecendo destaque os valores de confiança apresentados pela unidade siltico-arenosa da Formação Gaspar e pela Formação Ribeirão Carvalho.

A avaliação dos valores negativos de contraste da unidade geológica Gnaisses Granulíticos Luis Alves sugere cautela no que se refere à interpretação da favorabilidade. Conforme consta na Tabela 3.1, esta evidência apresenta valor de contraste da ordem -0,52, afeiçoado por um valor de -3,97 do nível confiança. É evidente a existência de uma inconsistência lógica, e que por sua vez deriva do delineamento adotado para definição da área de estudo.

A manifestação de 89 deslizamentos (Tabela 3.1) em uma área de cerca de 200 km<sup>2</sup> já constitui prova da existência de suscetibilidade natural, e que por sua vez está vinculada às particularidades das condições ambientais derivadas do contexto geológico-geomorfológico no domínio das rochas do complexo granulítico na área de estudo.

O fato de a análise de favorabilidade operar em termos relativos implica na sensibilidade dos resultados quanto ao tamanho da área total, bem como a proporção e o arranjo espacial de cada classe de evidência (Bonham-Carter 1994; Longley et al. 2013).

Correia et al. (2013), através do emprego da técnica de ponderação bayesiana, obtiveram os maiores valores de favorabilidade para as rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina em uma área de aproximadamente 370 km<sup>2</sup> que inclui, inclusive, parte da área do presente estudo, a despeito da existência de algumas diferenças metodológicas.

As restrições relacionadas à utilização do tema de evidência unidades geológicas derivam das incertezas relacionadas ao processo de integração de dados de diferentes fontes e escalas, da indisponibilidade de dados da distribuição das unidades litológicas em escala compatível (1:25.000 p. ex.) para todo o território, e por ainda assim compreender um indicador indireto de natureza nominal.

Neste caso, a compartimentação da área de estudo utilizando como critério os domínios geomorfológicos, considerando a distribuição dos condicionantes de natureza litoestrutural, representa uma possibilidade para reduzir as incertezas

associadas à utilização das unidades geológicas, conforme demonstrado adiante no capítulo 4.

Ainda, outra maneira de contornar o problema derivado da representação de variáveis nominais discretas, uma alternativa seria a utilização de atributos que representam indicadores diretos, ou seja, aqueles cujas propriedades se relacionam com o tipo de rocha, mas que possuam uma correspondência clara com o fenômeno em análise e permitam uma representação mais aproximada da variação contínua, por exemplo, tipo e profundidade dos solos, composição granulométrica, peso específico, condutividade hidráulica, valores de coesão, ângulo de atrito interno, entre outros.

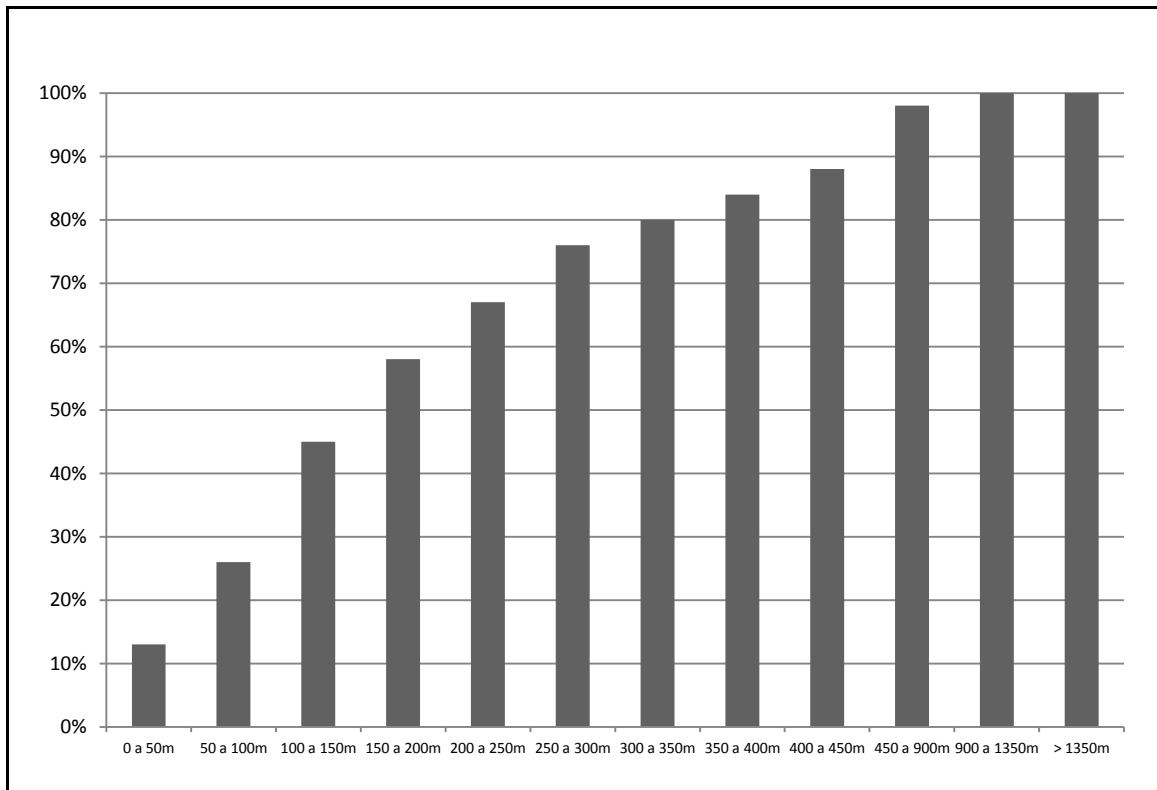
O reflexo da tectônica no relevo é expresso por lineamentos morfoestruturais marcantes (Figura 3.1) que condicionam drenagens, escarpas e alinhamentos de cristas distribuídos segundo as direções mais proeminentes NW e NE. Essas feições são relacionadas, no mínimo, a dois eventos principais. O primeiro na transição Neoproterozóico/Cambriano, envolvendo o Cinturão Dom Feliciano e o Cráton Luis Alves na formação do Gondwana ocidental. O outro diz respeito à reativação mesozoica, responsável pelo rifteamento precursor do oceano Atlântico Sul (Castro et al. 2003, Basei et al., 2011).

Conforme exposto na Tabela 3.2 e ilustrado na Figura 3.10, todos os deslizamentos foram registrados até a distância máxima considerada, conquanto, 76% deles encontram-se distribuídos até a distância de 300 m, e que corresponde a 66% da área de estudo.

**Tabela 3.2** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais para as faixas de distâncias de lineamentos morfoestruturais no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^+$	$s(W^+)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
0 a 50 m	68,7	13,2	37	12,6	-0,05	0,16	0,01	0,06	-0,05	0,18	-0,30
50 a 100 m	134,9	25,9	77	26,2	0,01	0,11	0,00	0,07	0,01	0,13	0,11
100 a 150 m	196,7	37,8	131	44,6	0,17	0,09	-0,12	0,08	0,28	0,12	2,40
150 a 200 m	252,3	48,4	170	57,8	0,18	0,08	-0,20	0,09	0,38	0,12	3,20
200 a 250 m	301,0	57,8	196	66,7	0,14	0,07	-0,24	0,10	0,38	0,12	3,06
250 a 300 m	342,8	65,8	223	75,9	0,14	0,07	-0,35	0,12	0,49	0,14	3,59
300 a 350 m	378,0	72,6	236	80,3	0,10	0,07	-0,33	0,13	0,43	0,15	2,94
350 a 400 m	406,8	78,1	246	83,7	0,07	0,06	-0,29	0,14	0,36	0,16	2,30
400 a 450 m	430,4	82,6	259	88,1	0,06	0,06	-0,38	0,17	0,44	0,18	2,46
450 a 900 m	514,4	98,8	287	97,6	-0,01	0,06	0,64	0,38	-0,66	0,38	-1,71
900 a 1350 m	520,9	100,0	293	99,7	0,00	0,06	3,95	1,00	-3,95	1,00	-3,95
> 1350 m	520,9	100,0	294	100,0	0,00	0,06	11,17	14,14	-11,17	14,14	-0,79

**Onde:**  $W^+$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^+)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.



**Figura 3.10** – Distribuição da frequência cumulativa de deslizamentos em relação às distâncias dos lineamentos morfoestruturais.

A importância da disposição das feições do relevo associadas aos lineamentos morfoestruturais traduz-se na influência destes exercida sobre o modelamento (Soares & Fiori 1976), predispondo a ocorrência de movimentos de massa segundo as principais feições traçadas na área de estudo, dentro da faixa de distância de até 300 m, considerando a distribuição dos valores de contraste (Tabela 3.2).

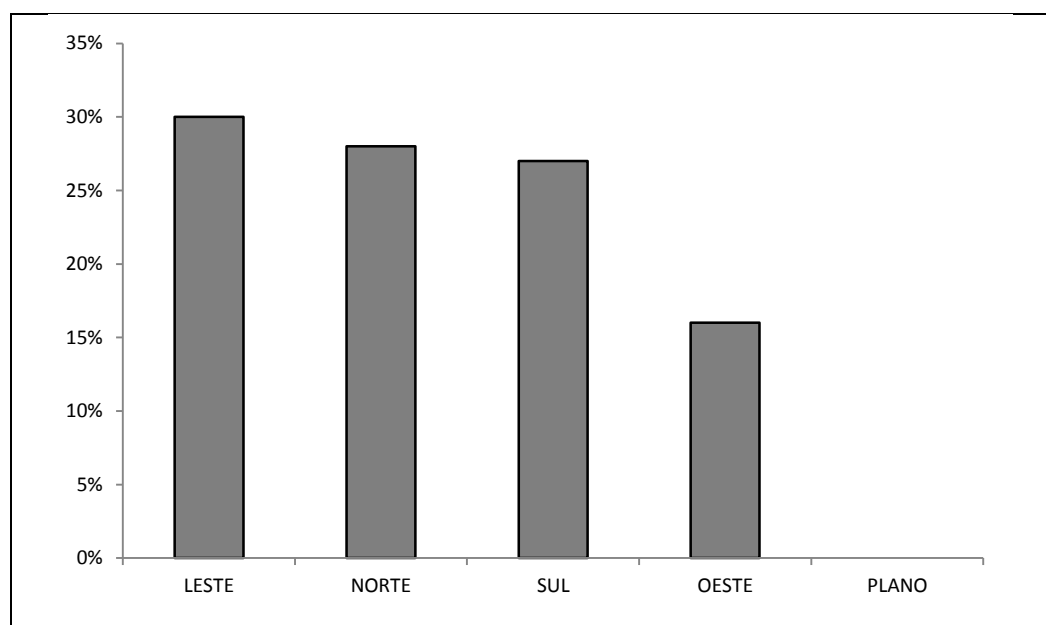
No que se refere à frequência de ocorrência dos deslizamentos em relação à orientação das encostas (Tabela 3.1 e Figura 3.9), é possível notar que os deslizamentos ocorreram nas encostas voltadas para os quadrantes Leste (30%), Norte (28%), Sul (27%) e Oeste (16%). Contudo, no tocante às relações de associação espacial, os resultados obtidos (Tabela 3.1) sugerem que as direções Sul, Leste e Norte são aquelas que, em ordem decrescente, apresentam-se como favoráveis à ocorrência de deslizamentos na área de estudo. As três classes ocupam 72% da área de estudo e respondem por 85% dos movimentos utilizados na análise.

A orientação das vertentes mantém relação direta com a exposição à insolação, influenciando nas taxas de evapotranspiração e no teor de água do solo (Moore et al. 1993, Qiu et al. 2001, Romano & Palladino 2002, Soares et al. 2002, Abnee et al. 2004, Coelho 2010, Geroy et al. 2011). Neste sentido, é possível presumir que, nos subtropicais, as encostas situadas nas faces de menor insolação, apresentem maiores teores de umidade antecedente do solo, influenciando na quantidade de água que poderá infiltrar e ser estocada até o solo atingir a condição limite de estabilidade (Baum & Godt 2010, Hawke & McConchie 2011). Os maiores valores de contraste, afiançados por elevados valores de confiança, observados para as vertentes voltadas para o quadrante sul (Tabela 3.1), podem refletir os efeitos decorrentes de menor exposição à insolação sobre a estabilidade das encostas.

**Tabela 3.3** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais para as classes de orientação das vertentes no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^*$	$s(W^*)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
Plano	25,6	5	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Norte	130,3	25	81	28	0,10	0,11	-0,03	0,07	0,13	0,13	1,00
Leste	133,1	26	88	30	0,16	0,11	-0,06	0,07	0,22	0,13	1,72
Sul	110,4	21	78	27	0,22	0,11	-0,07	0,07	0,30	0,13	2,23
Oeste	121,5	23	47	16	-0,38	0,15	0,09	0,06	-0,47	0,16	-2,95

Onde:  $W^*$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^*)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.



**Figura 3.11** – Distribuição da frequência de deslizamentos em relação às classes de orientação das vertentes.



Por outro lado, o pressuposto acima não elucida os valores apresentados para a face Norte, dado que estas representam àquelas que, na área de estudo, encontram-se em situação de maior exposição à insolação. Neste caso, a favorabilidade das encostas do quadrante Norte poderia refletir os efeitos de eventuais descontinuidades litoestruturais.

Conforme sugerido por Frascá e Sartori (1998), as descontinuidades referem-se a feições macroscópicas que expressam qualquer estrutura geológica que interrompa, ou possa interromper, quando submetida a determinadas cargas, a continuidade física da rocha. O termo engloba as estruturas relacionadas às juntas, falhas, fraturas, fissuras, podendo eventualmente incluir planos de fraqueza em acamamentos, bandamentos e foliações. As descontinuidades propiciam a percolação de água, favorecendo o intemperismo e a formação de argilominerais. Estes, por sua vez, podem ser carreados deixando cavidades que facilitam ainda mais a percolação de água, ou tornar lubrificada uma superfície de ruptura, facilitando os deslizamentos (Frascá & Sartori 1998, Magalhães & Cella 1998).

As descontinuidades distribuem-se espacialmente segundo orientações preferenciais, agrupando-se em sistemas ou famílias. A orientação das descontinuidades em relação à superfície das encostas pode condicionar a estabilidade ou favorecer a ruptura. As superfícies de ruptura tendem a seguir as descontinuidades pré-existentes, especialmente quando o plano da descontinuidade encontra-se paralelo ao da superfície da encosta ou ainda em situações de maior complexidade em que a interação de dois ou mais sistemas de descontinuidades estabelecem cunhas instáveis (Magalhães & Cella 1998, Fiori & Carmignani 2009).

Para o caso das vertentes voltadas para Leste (Tabela 3.3 e Figura 3.11), além da influência exercida pela disposição de eventuais descontinuidades litoestruturais, outro aspecto que pode ser relacionado com a favorabilidade revelada, diz respeito à possibilidade de uma maior incidência de chuvas advindas do quadrante Leste. Conforme análise sinóptica realizada por Severo (2009), nos momentos de maior precipitação durante o evento de 2008, ao qual se vincula a deflagração dos deslizamentos utilizados como modelo no presente trabalho, o vento soprava do quadrante leste e a umidade associada com as chuvas teria origem no oceano atlântico.

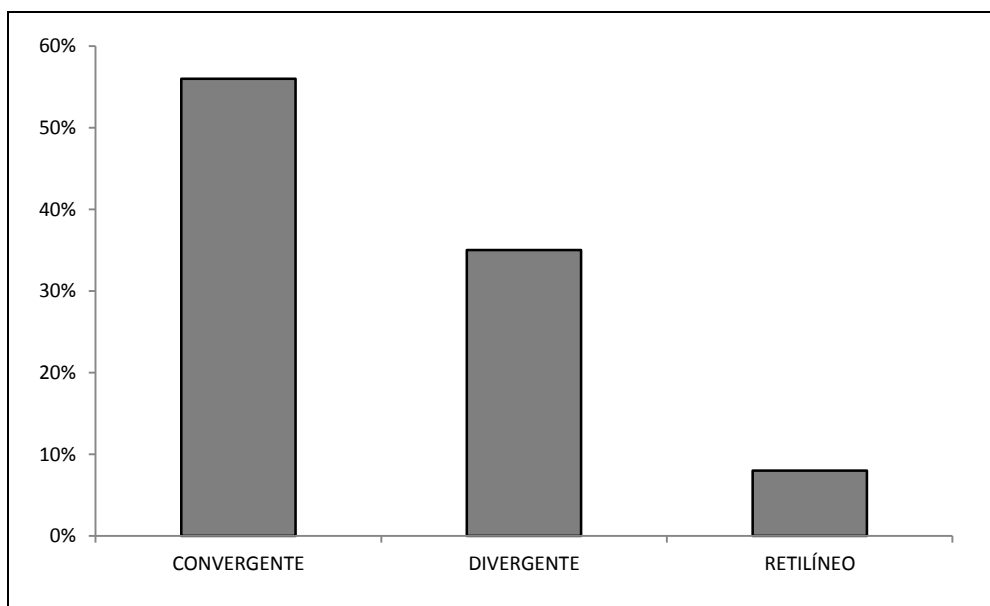
Considerando a distribuição espacial dos deslizamentos em relação ao plano de curvatura, é possível notar que 56% dos eventos foram registrados nas vertentes convergentes, 35% nas superfícies divergentes e 8% nas retilíneas (Tabela 3.4 e Figura 3.12). Quanto à associação espacial, àquelas com plano de curvatura convergente é que atendem os requisitos de favorabilidade (Tabela 3.4).

Os resultados convergem ao pressuposto de que os segmentos lateralmente côncavos seriam os mais favoráveis à ocorrência de deslizamentos (Wilson & Dietrich 1987; Selby 1982, Dikau 1994, McKean et al. 1991, Fernandes & Amaral 1996, Matsushi 2006). A concentração de fluxo hídrico orientada pela forma lateralmente côncava predispõe a formação de zonas com diferentes intensidades de saturação hídrica, muitas vezes traduzindo-se nos locais da paisagem de maior sujeição à redução da coesão aparente ou às condições de poro-pressões positivas críticas, especialmente nos eventos de intensa precipitação pluviométrica (Montgomery & Dietrich 1994, Fernandes et al. 2001, Fernandes et al. 2004, Vieira & Fernandes 2004, Ahrendt 2005, Fiori & Carmignani 2009).

**Tabela 3.4** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais para as classes de curvatura horizontal das encostas no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^*$	$s(W^*)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
Convergente	180,1	34,6	166	56	0,49	0,08	-0,41	0,09	0,90	0,12	7,63
Retilínea	87,8	16,9	24	8	-0,72	0,20	0,10	0,06	-0,82	0,21	-3,87
Divergente	253,0	48,6	104	35	-0,32	0,10	0,23	0,07	-0,55	0,12	-4,47

Onde:  $W^*$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^*)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.



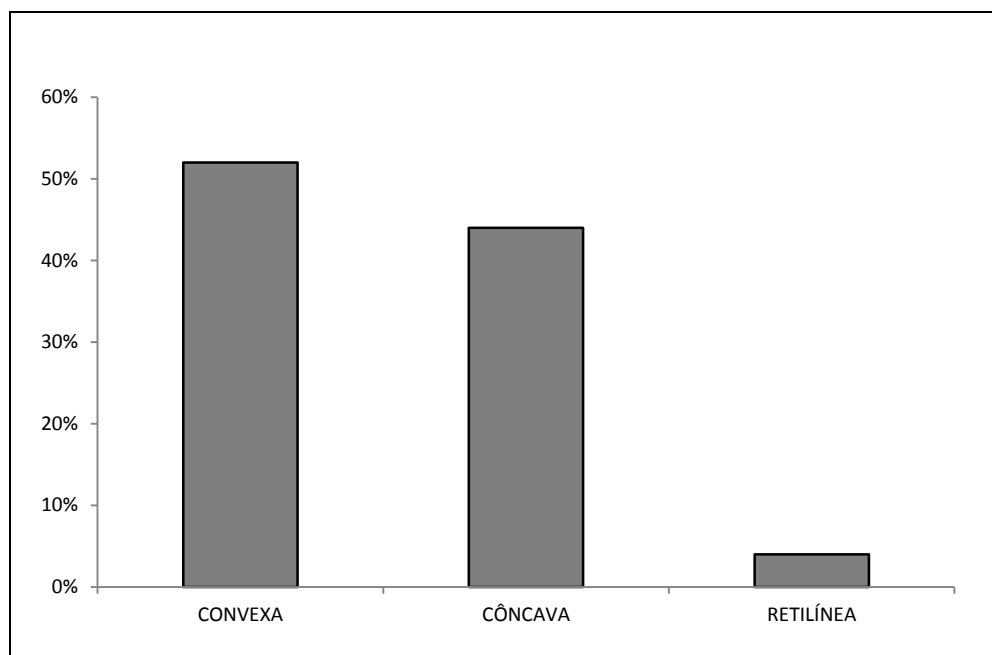
**Figura 3.12** – Distribuição da frequência de deslizamentos em relação ao plano de curvatura.

Em relação ao perfil de curvatura, 52% dos deslizamentos foram registrados em segmentos convexos, 44% em côncavos e 4% nos retilíneos (Tabela 3.5 e Figura 3.13). Contudo, somente os segmentos convexos são àqueles que, na área de estudo, apresentaram significativos valores de contraste positivo (Tabela 3.5). O valor de contraste das encostas côncavas, embora positivo, não é significativo, segundo o critério adotado (Tabela 3.5).

**Tabela 3.5** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais para as classes de curvatura vertical das encostas no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^*$	$s(W^*)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
Convexa	230,6	44,3	152	52	0,16	0,08	-0,14	0,08	0,30	0,12	2,55
Retilínea	73,2	14,1	12	4	-1,24	0,29	0,11	0,06	-1,35	0,29	-4,57
Côncava	217,0	41,7	130	44	0,06	0,09	-0,04	0,08	0,10	0,12	0,89

Onde:  $W^*$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^*)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.



**Figura 3.13** – Distribuição da frequência de deslizamentos em relação às classes do perfil de curvatura.

As encostas retilíneas, em projeção vertical, apresentam erosão limitada pelo grau de intemperismo, condicionando a manutenção de solos menos espessos e escoamento linear subparalelo. As encostas côncavas, por sua vez, resultam do balanço entre o transporte e a deposição, ao passo que as encostas convexas tendem a apresentar solos relativamente mais espessos, onde a erosão encontra-se

limitada pela capacidade de transporte (Summerfield 1991, Soares et. al. 2002). O aumento da capacidade de transporte pode resultar da modificação das relações de estabilidade promovida por fluxos hídricos em eventos estocásticos, sugerindo que o desenvolvimento do relevo está entalhando as superfícies que, supostamente, apresentam solos mais espessos, na condição de equilíbrio limite.

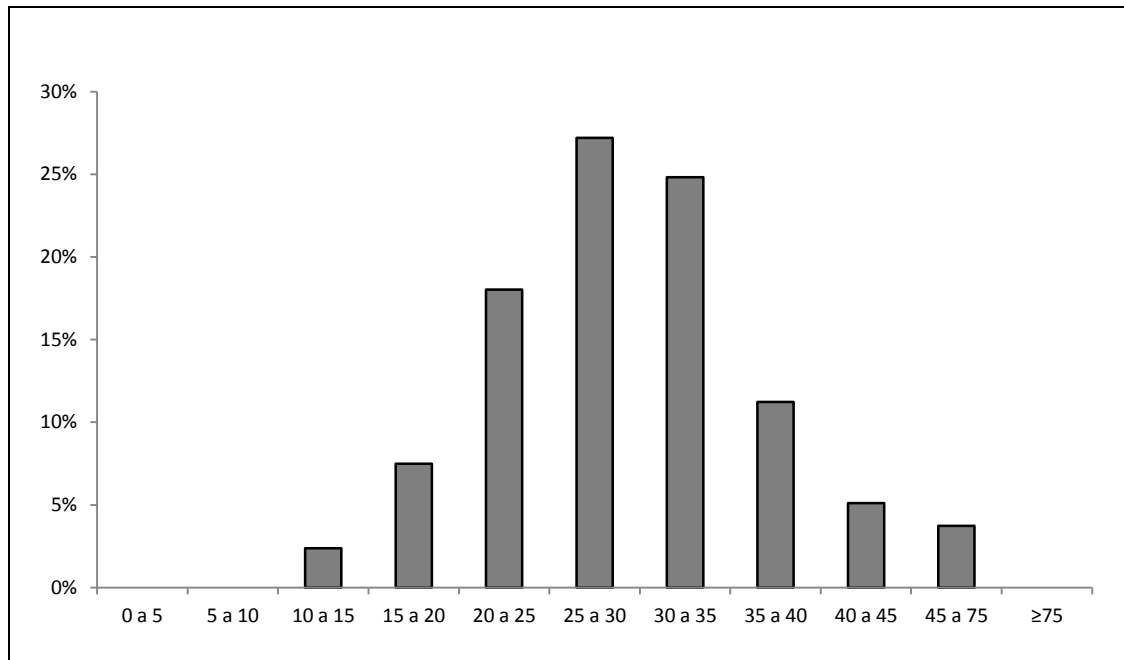
Na dependência do tipo de material em apreço, o ângulo máximo de declividade alcançado quando ocorre a ruptura pode ser considerado como o ângulo limite de estabilidade (Holtz & Kovacz 1981, Summerfield 1991, Fiori & Carmignani 2009). Os resultados obtidos demonstram que os deslizamentos ocorreram em vertentes com declividades que variaram entre 10 e 75° de declividade (Tabela 3.6 e Figura 3.14).

No entanto, a faixa de declividade que apresentou significativos valores de favorabilidade à ocorrência de deslizamentos na área de estudo encontra-se entre 20° e 75° (Tabela 3.6), onde se destacam os indicadores obtidos para as declividades entre 30° e 35°. A amplitude de variação da faixa favorável de declividade constitui forte indicativo da variedade de materiais envolvidos, bem como da atuação diferenciada dos mecanismos de instabilização.

**Tabela 3.6** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais para as classes de declividade no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^*$	$s(W^*)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
<i>Declividade</i>											
0 a 5°	88,6	17	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 a 10°	52,2	10	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 a 15°	65,4	13	7	2	-1,66	0,38	0,11	0,06	-1,77	0,38	-4,63
15 a 20°	79,4	15	22	7	-0,71	0,21	0,09	0,06	-0,80	0,22	-3,61
20 a 25°	82,6	16	53	18	0,13	0,14	-0,03	0,06	0,15	0,15	1,02
25 a 30°	68,2	13	80	27	0,73	0,11	-0,18	0,07	0,91	0,13	6,93
30 a 35°	44,4	9	73	25	1,07	0,12	-0,20	0,07	1,26	0,14	9,37
35 a 40°	23,5	5	33	11	0,91	0,17	-0,07	0,06	0,98	0,18	5,32
40 a 45°	10,5	2	15	5	0,93	0,26	-0,03	0,06	0,96	0,27	3,63
45 a 75°	5,9	1	11	4	1,19	0,30	-0,03	0,06	1,22	0,31	3,97
≥75°	0,03	0,01	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Onde:**  $W^*$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^*)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.



**Figura 3.14** – Distribuição da frequência de deslizamentos em relação às classes de declividade, expressa em graus.

No que concerne aos aspectos relativos à estabilidade de encostas, a influência da declividade está vinculada com a magnitude das forças gravitacionais atuantes, e que se expressa através do peso por unidade de área dos materiais que constituem as vertentes. Esta carga pode ser derivada em duas componentes. A primeira, denominada de tensão normal, atua em ângulo reto à superfície de ruptura, contribuindo para a resistência à fricção, porque a carga exercida acaba forçando os constituintes entre si. A resistência à fricção resulta tanto da tensão normal atuante, quanto das propriedades inerentes dos materiais. A segunda componente, denominada de tensão cisalhante, age paralela à superfície de ruptura, ao longo da qual ocorre o movimento. Na medida em que o ângulo do plano de cisalhamento torna-se mais acentuado, a tensão de cisalhamento torna-se maior em detrimento da tensão normal. Assim, a capacidade de transporte de massas será diretamente proporcional à inclinação, conforme as propriedades inerentes dos materiais envolvidos, em especial o peso específico, a coesão e o ângulo de atrito interno (Tuttle 1970, Tricart 1972, Thomas 1979, Holtz & Kovacz 1981, Tarboton et al. 1991, Christofolletti 1974, Summerfield 1991, Augusto Filho & Virgili 1998, Fiori & Carmignani 2009).

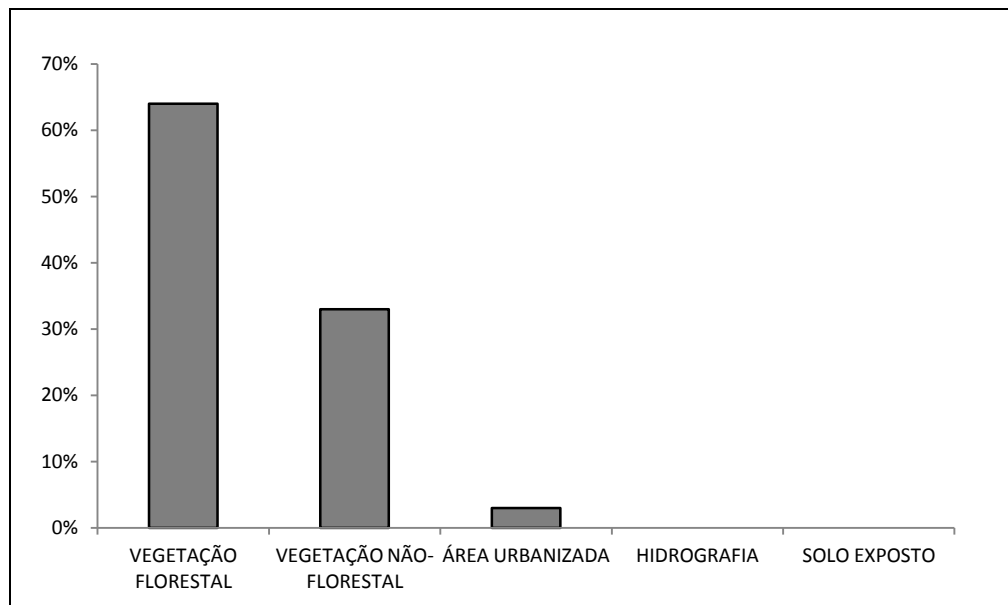
Além dos efeitos decorrentes da atuação de atributos geológicos e geomorfológicos, a estabilidade das encostas pode ser influenciada também pelo

tipo de cobertura do solo. Dentre os 294 deslizamentos utilizados como modelo de evento no presente estudo, 97% ocorreram nos sítios com cobertura vegetal, dos quais 64% ocorreram em locais com cobertura florestal e 33% em locais com cobertura vegetal não florestal. Os demais 3% ocorreram em locais com padrão de cobertura classificado como área urbanizada (Tabela 3.7 e Figura 3.14).

**Tabela 3.7** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais para as classes de uso do solo no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^+$	$s(W^+)$	$W^-$	$s(W^-)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
<i>Uso do Solo</i>											
VEGETAÇÃO FLORESTAL	263,4	50,6	188	64	0,23	0,07	-0,32	0,10	0,55	0,12	4,53
VEGETAÇÃO NÃO-FLORESTAL	110,8	21,3	96	33	0,43	0,10	-0,16	0,07	0,59	0,12	4,71
ÁREA URBANIZADA	122,4	23,5	9	3	-2,04	0,33	0,24	0,06	-2,27	0,34	-6,72
HIDROGRAFIA	22,8	4,4	1	0	-2,55	1,00	0,04	0,06	-2,60	1,00	-2,59
SOLO EXPOSTO	1,6	0,3	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Onde:**  $W^+$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^+)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W^-$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W^-)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.



**Figura 3.14** – Distribuição da frequência de deslizamentos em relação às classes de uso do solo.

Os resultados obtidos como ponderadores bayesianos (Tabela 3.7) revelam para a área de estudo que, entre os diferentes padrões de cobertura do solo, as áreas com cobertura vegetal (florestal ou não florestal) é que atendem os requisitos de favorabilidade à ocorrência de deslizamentos, conforme o modelo de evento e o método de análise utilizado.

Padrão similar é também revelado para os resultados de favorabilidade do NDVI. As classes que apresentaram significativos valores de confiança (Tabela 3.8), respondem juntas por 51% dos deslizamentos utilizados como modelo de evento, e correspondem a sítios com algum tipo de cobertura vegetal.

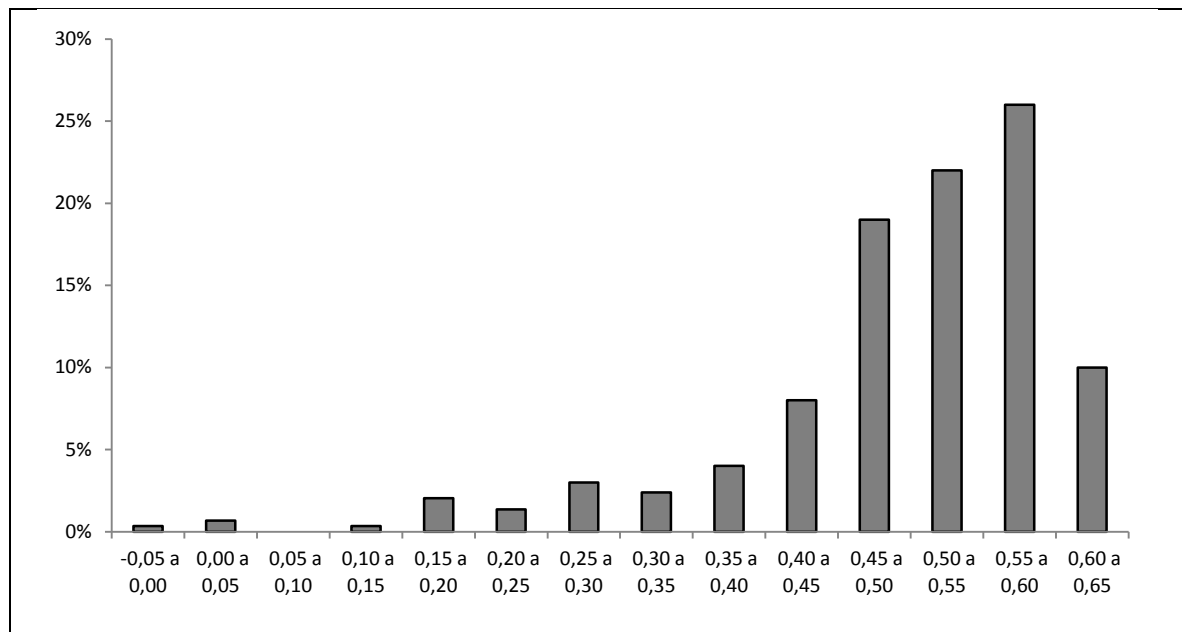
**Tabela 3.8** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais para as classes do NDVI no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^*$	$s(W^*)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
-0,70 a -0,65	0,00	0,0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,65 a -0,60	0,01	0,0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,60 a -0,55	0,06	0,0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,55 a -0,50	0,53	0,1	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,50 a -0,45	0,86	0,2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,45 a -0,40	0,28	0,1	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,40 a -0,35	0,27	0,1	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,35 a -0,30	0,21	0,0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,30 a -0,25	0,20	0,0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,25 a -0,20	0,14	0,0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,20 a -0,15	0,25	0,0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,15 a -0,10	0,85	0,2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,10 a -0,05	1,78	0,3	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,05 a 0,00	8,71	1,7	1	0	-1,59	1,00	0,01	0,06	-1,61	1,00	-1,60
0,00 a 0,05	7,37	1,4	2	1	-0,73	0,71	0,01	0,06	-0,74	0,71	-1,04
0,05 a 0,10	10,90	2,1	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10 a 0,15	12,00	2,3	1	0	-1,91	1,00	0,02	0,06	-1,93	1,00	-1,93
0,15 a 0,20	13,62	2,6	6	2	-0,25	0,41	0,01	0,06	-0,25	0,41	-0,61
0,20 a 0,25	14,87	2,9	4	1	-0,74	0,50	0,02	0,06	-0,76	0,50	-1,50
0,25 a 0,30	17,32	3,3	9	3	-0,08	0,33	0,00	0,06	-0,09	0,34	-0,25
0,30 a 0,35	20,62	4,0	7	2	-0,51	0,38	0,02	0,06	-0,52	0,38	-1,37
0,35 a 0,40	31,02	6,0	12	4	-0,38	0,29	0,02	0,06	-0,40	0,29	-1,35
0,40 a 0,45	41,87	8,0	24	8	0,02	0,20	0,00	0,06	0,02	0,21	0,08
0,45 a 0,50	74,02	14,2	57	19	0,31	0,13	-0,06	0,07	0,37	0,15	2,53
0,50 a 0,55	94,25	18,1	65	22	0,20	0,12	-0,05	0,07	0,25	0,14	1,78
0,55 a 0,60	124,14	23,8	76	26	0,08	0,11	-0,03	0,07	0,11	0,13	0,81
0,60 a 0,65	43,52	8,4	30	10	0,20	0,18	-0,02	0,06	0,22	0,19	1,14
0,65 a 0,70	1,23	0,2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,70 a 0,75	0,01	0,0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Onde:**  $W^*$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^*)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.

Os resultados da análise de favorabilidade, obtidos tanto para o tema uso do solo quanto para o NDVI, sugerem que, apesar dos efeitos positivos promovidos pela cobertura vegetal sobre a estabilidade das encostas, eles não foram, para os casos analisados, suficientemente significativos para eliminar os efeitos negativos associados à presença de cobertura vegetal ou os de outros fatores que, supostamente, seriam preponderantes no controle dos movimentos utilizados como modelo de evento, conforme proposto por Rodrigues (2002). Neste caso, a aplicação de testes estatísticos pareados pode ajudar a elucidar as relações de dependência espacial entre os diferentes padrões de cobertura do solo e os demais fatores

condicionantes e, então, contribuir para o melhor entendimento do papel desempenhado pela cobertura vegetal sobre a estabilidade das encostas.



**Figura 3.14** – Distribuição da frequência de deslizamentos em relação às classes do NDVI.

Outro aspecto que dever ser considerado na interpretação do papel desempenhado pela cobertura vegetal, diz respeito às consequências do processo de supressão florestal a que a área de estudo foi intensa e extensivamente submetida até meados da década de 1970, conforme relatado por diferentes autores (Veloso & Klein 1957, Klein 1979, Klein 1980, Leite & Klein 1990, Vibrans 1999, Sevegnani 2002; Aumond & Sevegnani 2009, Vibrans et al. 2013). As ações relacionadas ao processo de desmatamento promovem alterações na configuração do ambiente e sobre os fluxos hídricos de superfície e de subsuperfície (cortes e aterros para abertura de estradas e acessos, trilhas para remoção de madeira, revolvimento de solo, apodrecimento de tocos e raízes, entre outros), influenciando sobre as condições de estabilidade das encostas, induzindo a formação de áreas suscetíveis ou potencializando as situações naturais existentes.

Considerando a atuação diferenciada dos efeitos da vegetação sobre a estabilidade das encostas, Rodrigues (2002) aponta algumas características que precisam ser consideradas nas proposições relativas ao favorecimento por parte da vegetação à ocorrência de deslizamentos, dentre as quais destaca o tipo de vegetação e sua distribuição espacial considerando: i) o tipo, profundidade, densidade, distribuição lateral e resistência à tração do sistema de raízes; ii) capacidade de armazenamento de água na superfície; iii) capacidade de



evapotranspiração; iv) estrutura vertical e horizontal. Neste caso, a complexidade e a variabilidade espacial dos atributos da vegetação natural (Klein 1979, Sevegnani 2002, Vibrans 2003, Vibrans et al. 2013) constituem importantes restrições ao estabelecimento de generalizações acerca do favorecimento por parte da vegetação à ocorrência de deslizamentos e sugere a necessidade da realização de investigações detalhadas de aspectos vinculados ao papel da vegetação na estabilidade de vertentes, considerando a variabilidade ambiental na área de estudo.

Dentre todos os fatores utilizados na análise de favorabilidade, a declividade é o único que mantém vínculo direto com as forças que regem a estabilidade das vertentes. Quando não considerados os valores de associação espacial das unidades geológicas, os valores de contraste apresentados pelas classes de declividade figuram como os mais expressivos. No intuito de identificar os modelos que apresentaram ajustes razoáveis, com relação ao atendimento da condição de independência dos dados e quanto à eficiência de classificação e de predição, foram simuladas 19 combinações de integração dos pesos das classes de declividade com aqueles obtidos para os demais temas de evidência (Tabela 3.9).

**Tabela 3.9** – Relação dos esquemas de integração dos diferentes temas de evidência e resultados da análise global de independência espacial dos dados.

MODELOS	TEMAS INTEGRADOS	T	(T-n)	s(T)	ACCIT	CIR
1	2 + 4 + 6	314.10	20.10	14.18	12.94	0.94
2	4 + 6	314.20	20.20	16.31	17.80	0.94
3	5 + 6	319.30	25.30	16.51	13.17	0.92
7	1 + 3 + 4 + 6	330.50	36.50	10.60	-11.80	0.89
4	4 + 5 + 6	340.30	46.30	14.36	-12.84	0.86
5	2 + 4 + 6 + 8	330.10	36.10	8.89	-15.39	0.89
6	2 + 3 + 4 + 6	330.40	36.40	8.98	-15.47	0.89
9	3 + 4 + 6 + 8	347.70	53.70	6.60	-38.32	0.85
8	2 + 3 + 4 + 6 + 8	347.20	53.20	5.47	-40.47	0.85
10	3 + 4 + 5 + 6	357.90	63.90	9.03	-42.86	0.82
11	2 + 3 + 4 + 5 + 6	357.90	63.90	7.59	-46.21	0.82
12	3 + 4 + 5 + 6 + 8	376.40	82.40	5.51	-69.57	0.78
13	2 + 3 + 4 + 6 + 7	387.60	93.60	8.65	-73.45	0.76
14	1 + 2 + 3 + 4 + 6	396.40	102.40	6.67	-86.86	0.74
15	1 + 3 + 4 + 5 + 6	413.10	119.10	5.82	-105.54	0.71
17	3 + 4 + 5 + 6 + 7	421.30	127.30	8.81	-106.77	0.70
16	1 + 2 + 3 + 4 + 6 + 8	413.10	119.10	4.05	-109.65	0.71
18	1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6	431.00	137.00	5.55	-124.07	0.68
19	1 + 2 + 3 + 4 + 6 + 7	451.30	157.30	6.20	-142.85	0.65

1 – Unidades Geológicas; 2 – Lineamentos; 3 – Orientação de vertente; 4 – Curvatura horizontal; 5 – Curvatura vertical; 6 – Declividade; 7 – Uso do Solo e; 8 – NDVI; T – Somatório dos valores de probabilidade a posteriori; n – Número de pontos de treinamento; s(T) – Desvio padrão de T; ACCIT – Valor do teste Aterberg & Cheng de independência condicional; CIR – Razão de independência condicional.

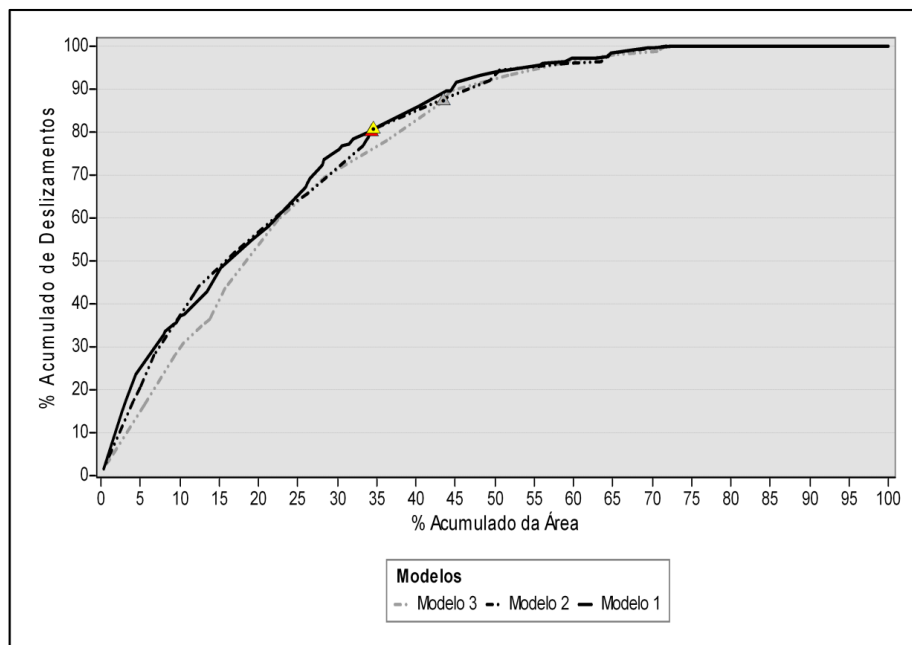
Conforme apresentado na Tabela 3.9, somente os três primeiros modelos atenderam os requisitos de independência entre os dados, considerando os valores de CIR e ACCIT. Dentre eles, o modelo 2, que integra os valores ponderados das classes favoráveis dos temas curvatura horizontal e declividade, é o que apresentou os melhores indicadores de independência dos dados.

Com relação à validação dos modelos, os resultados obtidos através das análises de eficiência de classificação e de predição demonstram respostas ligeiramente diferentes entre os três modelos (Tabela 3.10 e Figuras 3.15 e 3.16).

**Tabela 3.10** - Indicadores de eficiência de classificação e predição dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos translacionais que atenderam os requisitos de independência condicional para o território de Blumenau (SC), Brasil.

MODELOS	TEMAS COMBINADOS	AUC <sup>1</sup>	% <sup>1</sup>	AUC <sup>2</sup>	% <sup>2</sup>
1	2 + 4 + 6	0,80	81	0,69	68
2	4 + 6	0,79	80	0,65	69
3	5 + 6	0,78	86	0,69	79

2 – Distância de Lineamentos; 4 – Curvatura horizontal; 5 – Curvatura vertical e; 6 – Declividade; AUC<sup>1</sup> – Valor da área sob a curva considerando os pontos de treinamento; %<sup>1</sup> – Frequência relativa dos 294 pontos de treinamento classificados corretamente; AUC<sup>2</sup> – Valor da área sob a curva considerando a área total das zonas de depleção; %<sup>2</sup> – Proporção da área total das zonas de depleção (30.679 unidades de área) classificada corretamente.

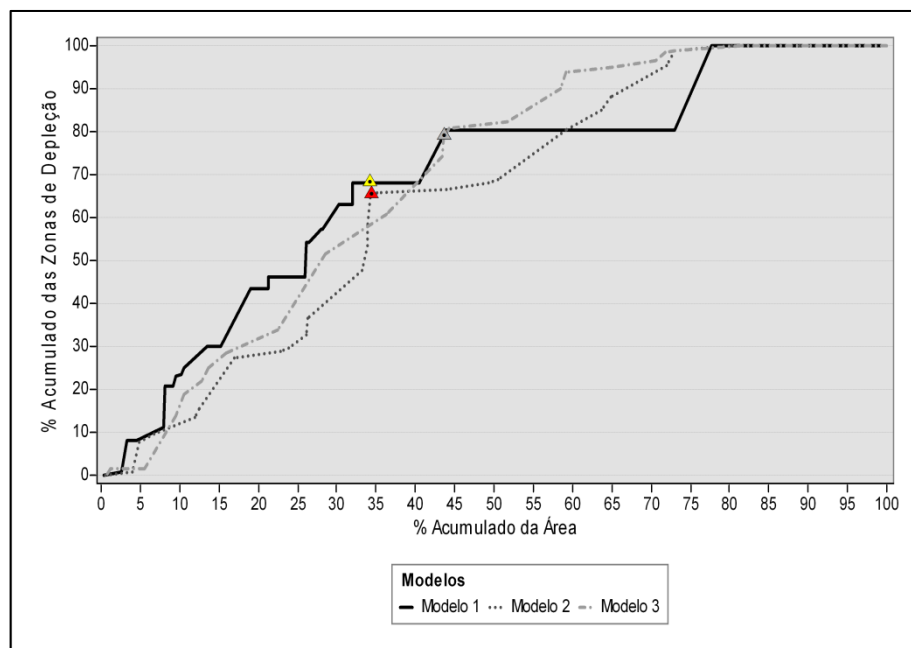


**Figura 3.15** – Curva da taxa de sucesso que expressa a eficiência de classificação dos 03 modelos de suscetibilidade que atenderam os requisitos de independência espacial. Destacados os pontos das curvas que interceptam o valor da probabilidade *a priori* (em amarelo para o modelo 1, em vermelho para o modelo 2 e em cinza para o modelo 3). O percentual acumulado da área encontra-se ordenado das áreas de maior para as de menor valor da probabilidade *a posteriori*.

A Figura 3.15, por sua vez, apresenta a curva da taxa de sucesso que expressa a eficiência de classificação dos 03 modelos de suscetibilidade que atenderam os requisitos de independência espacial.

Entre os três modelos selecionados, aquele que integra os valores dos temas declividade, curvatura horizontal e distância de lineamentos (modelo 1), apesar de apresentar menor proporção de pontos de treinamento classificados corretamente, exige área menor para tanto, o que lhe confere maior eficiência de classificação, considerando o valor de AUC<sup>1</sup> (Tabela 3.10 e Figura 3.15).

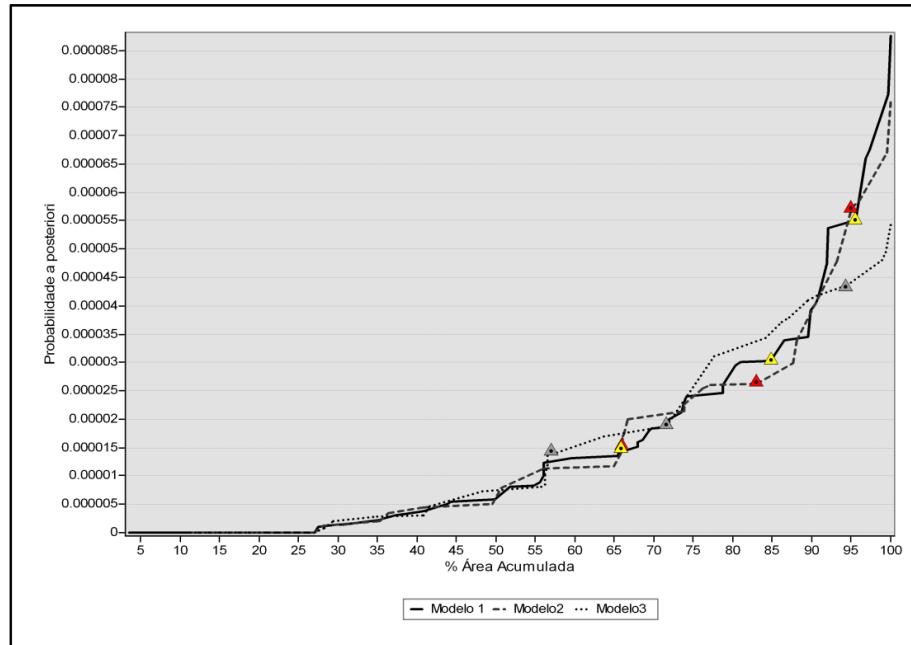
A Figura 3.16 apresenta as curvas da taxa de sucesso e, a Tabela 3.10, apresenta os valores da área sob a curva (AUC<sup>2</sup>) de cada um dos três modelos selecionados. Dos resultados obtidos, depreende-se que os modelos 1 e 3 foram os que apresentaram a maior eficiência de predição, em razão de apresentarem valores similares de AUC<sup>2</sup> (0,69).



**Figura 3.16** – Curvas da taxa de sucesso que expressa a eficiência de predição dos 03 modelos de suscetibilidade que atenderam os requisitos de independência espacial, considerando a proporção da área total das zonas de depleção. Destacados os pontos das curvas que interceptam o valor da probabilidade *a priori* (em amarelo para o modelo 1, em vermelho para o modelo 2 e em cinza para o modelo 3). O percentual acumulado da área encontra-se ordenado das áreas de maior para as de menor valor da probabilidade *a posteriori*.

Para os três modelos que atenderam os requisitos de independência condicional (Tabela 3.9), foram elaboradas as curvas de distribuição do valor de probabilidade *a posteriori* versus o percentual da área total acumulada (Figura 3.17).

A partir da interpretação destas curvas, foi então realizada a reclassificação dos valores de probabilidade *a posteriori* e definidas quatro classes de suscetibilidade, a saber, baixa, média, alta e muito alta suscetibilidade.



**Figura 3.17** – Curvas de distribuição dos valores de probabilidade *a posteriori* em relação ao percentual acumulado de área, para os modelos que atenderam os requisitos de independência condicional (modelos 1, 2 e 3). Valores utilizados para estabelecer os limites das classes de suscetibilidade encontram-se destacados, em amarelo para o modelo 1, em vermelho para o modelo 2 e em cinza para o modelo 3. O percentual acumulado da área encontra-se ordenado das áreas de maior para as de menor valor da probabilidade *a posteriori*.

A Tabela 3.11 apresenta a distribuição dos valores de probabilidade *a posteriori* adotados para cada um dos três modelos e os respectivos valores da área de abrangência e dos indicadores de eficiência de classificação e predição.

É possível depreender para o modelo 1, que 81% dos pontos de treinamento estão inseridos em áreas consideradas como suscetíveis, ou seja, àquelas cujos valores superam o da probabilidade *a priori*, e que, por sua vez, correspondem a cerca de 34% do total da área de estudo. As áreas consideradas de média suscetibilidade abrangem 19,3% do território e, nesta classe, 32% dos pontos de treinamento encontram-se inseridos. As áreas de alta a muito alta suscetibilidade manifestam-se em aproximadamente 15% da área de estudo, respondendo juntas por 48% dos pontos de treinamento. As áreas de baixa suscetibilidade correspondem a 65,5% da área de estudo (Tabela 3.11).

Para o modelo 2, que integra os valores dos temas declividade e curvatura horizontal, depreende-se que 80% dos pontos de treinamento estão inseridos em

áreas suscetíveis, e que também correspondem a cerca de 34% do total da área de estudo (Tabela 3.11). As áreas consideradas de média suscetibilidade abrangem 17,2% do território e, nesta classe, 28% dos pontos de treinamento encontram-se inseridos. As áreas de alta a muito alta suscetibilidade manifestam-se em aproximadamente 17% da área de estudo, respondendo juntas por 52% dos pontos de treinamento. As áreas de baixa suscetibilidade correspondem a 65,8% da área de estudo (Tabela 3.11).

**Tabela 3.11** – Classes de suscetibilidade a deslizamentos translacionais e respectivos valores da área de abrangência e da proporção dos pontos de treinamento e da área das zonas de depleção, para os três modelos de suscetibilidade a deslizamentos translacionais que atenderam os requisitos de independência condicional, considerando todo o território de Blumenau (SC), Brasil.

Classes de suscetibilidade	Valores de probabilidade a posteriori	Número de unidades de área	Área (Km <sup>2</sup> )	% <sup>1</sup>	% <sup>2</sup>	% <sup>3</sup>
<b>Modelo 1</b>						
Baixa	0 - 0,000014	13.655.881	341,4	65,5	19	32
Média	0,000015 - 0,000033	4.014.411	100,4	19,3	33	34
Alta	0,000034 - 0,000065	2.231.944	55,8	10,7	24	23
Muito Alta	0,000066 - 0,000088	934.541	23,4	4,5	24	11
<b>Modelo 2</b>						
Baixa	0 - 0,000014	13.714.206	342,86	65,8	20	31
Média	0,000015 - 0,000027	3.591.610	89,79	17,2	28	32
Alta	0,000028 - 0,000058	2.700.875	67,52	13,0	35	26
Muito Alta	0,000059 - 0,000076	830.086	20,75	4,0	17	11
<b>Modelo 3</b>						
Baixa	0 - 0,000014	11.774.456	294,36	56,5	13	21
Média	0,000015 - 0,000019	3.132.579	78,31	15,0	17	22
Alta	0,000020 - 0,000044	4.788.585	119,71	23,0	53	47
Muito Alta	0,000045 - 0,000055	1.141.157	28,53	5,5	16	10

%<sup>1</sup> – Proporção em relação ao total da área de estudo; %<sup>2</sup> – Frequência relativa dos 294 pontos de treinamento utilizados; %<sup>3</sup> – Proporção da área total das zonas de depleção (30.679 unidades de área).

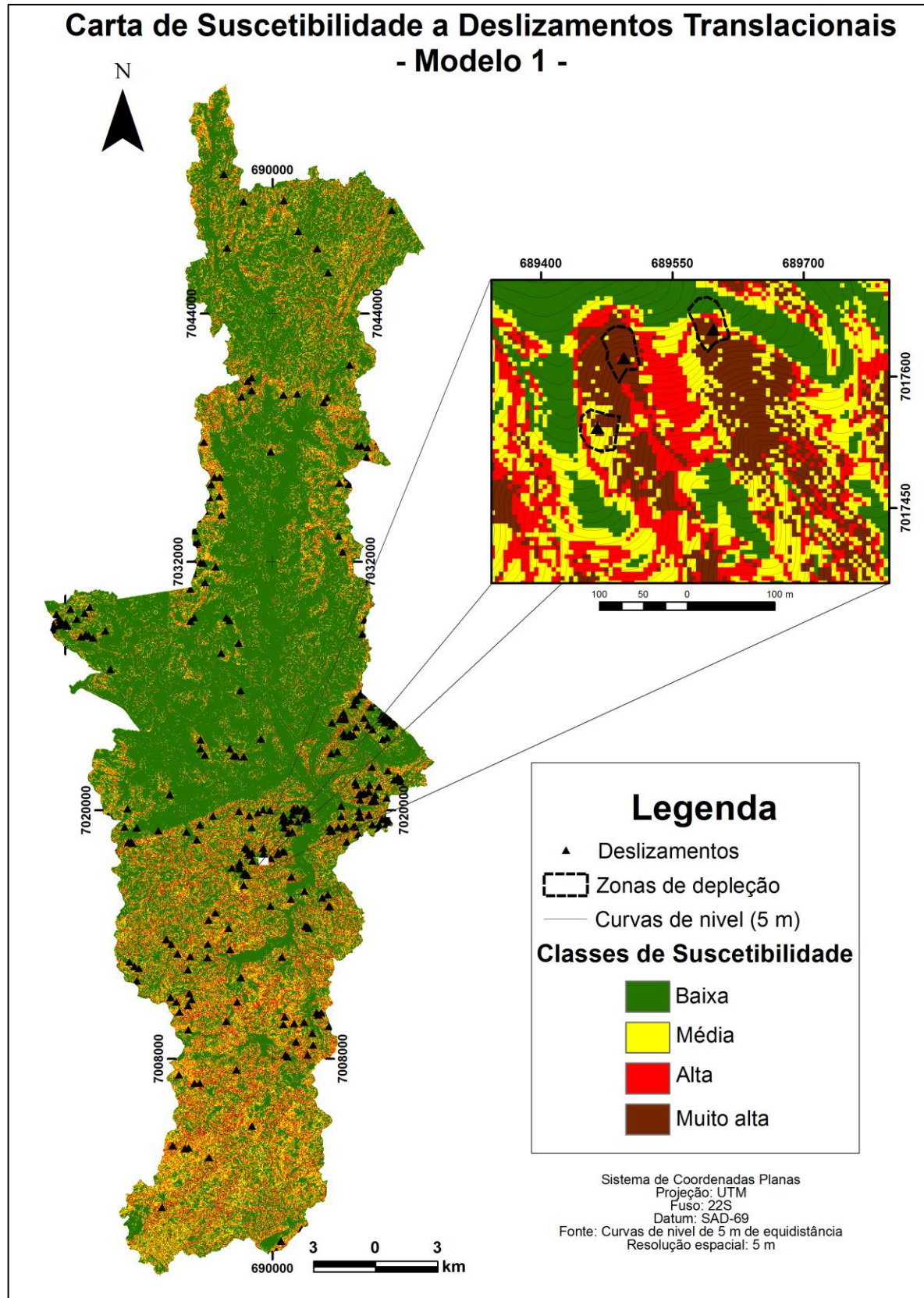
O modelo 3, que integra os valores dos temas declividade e curvatura vertical, apesar de apresentar o menor valor da área sob a curva (AUC<sup>1</sup>), que mede a eficiência de classificação, foi o que apresentou uma maior proporção (87%) de pontos de treinamentos inseridos em áreas classificadas como suscetíveis, mas que correspondem a cerca de 43,5% do total da área de estudo (Tabela 3.11). As áreas de baixa suscetibilidade correspondem a 56,5% da área de estudo. As áreas consideradas de média suscetibilidade abrangem 15% do território e, nesta classe, 17% dos pontos de treinamento encontram-se inseridos. As áreas de alta a muito alta suscetibilidade manifestam-se em aproximadamente 28,5% da área de estudo, respondendo juntas por 69% dos pontos de treinamento (Tabela 3.11).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3.11, para o caso do modelo 1, que integra os valores ponderados dos fatores declividade, curvatura horizontal e distância de lineamentos morfoestruturais, é possível notar que 68% da área total das zonas de depleção foram classificadas corretamente, dos quais, cerca de 51% correspondem a situações de alta a muito alta suscetibilidade. No caso do modelo 2, que integra os valores ponderados dos fatores declividade e curvatura horizontal, 69% da área total das zonas de depleção foram classificadas corretamente, dos quais, cerca de 54% correspondem a situações classificadas como de alta a muito alta suscetibilidade. Para o modelo 3, que integra os valores ponderados dos fatores declividade e curvatura vertical, 79% da área total das zonas de depleção foram classificadas corretamente, dos quais, cerca de 72% correspondem a situações classificadas como de alta a muito alta suscetibilidade.

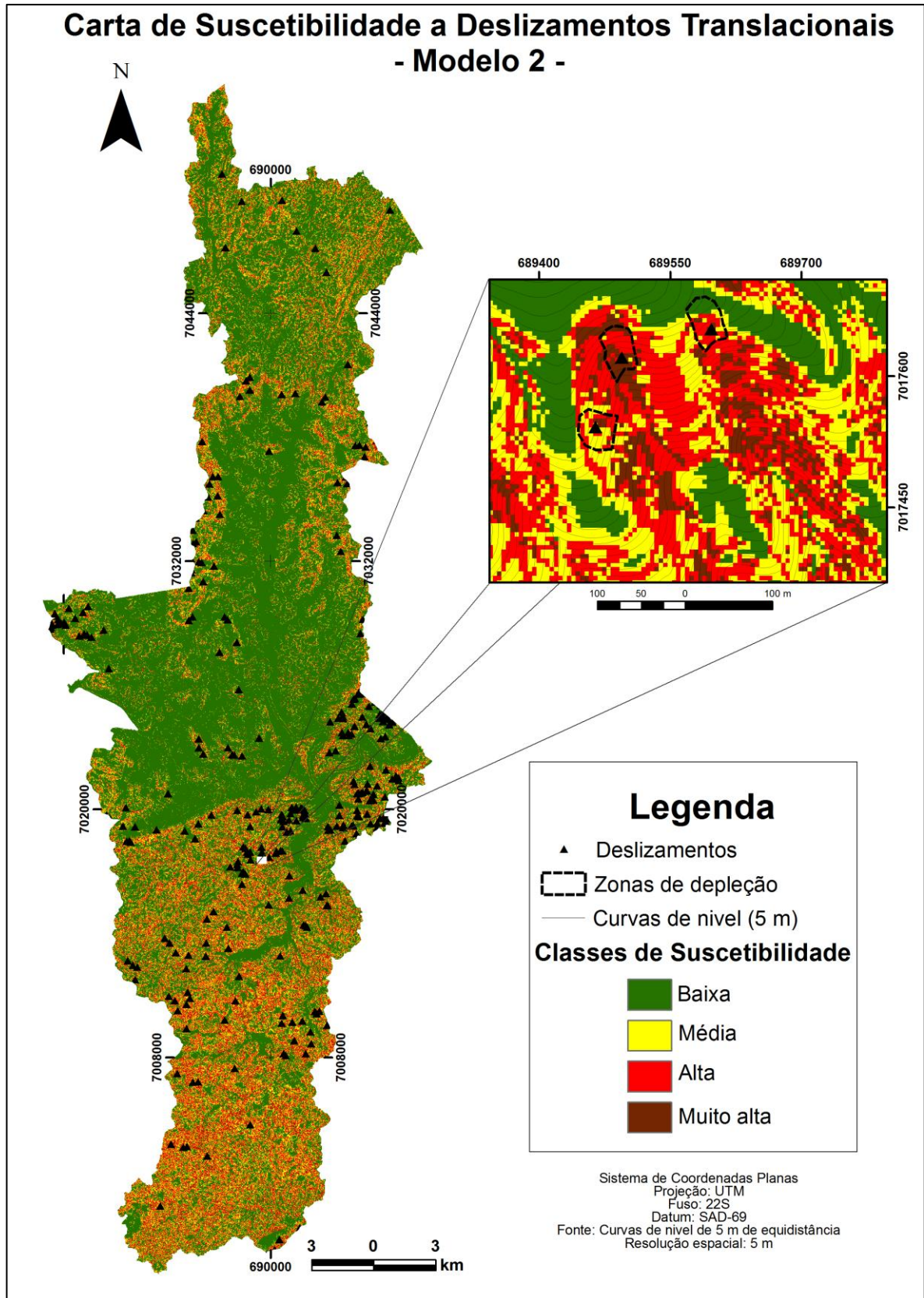
A distribuição espacial das classes de suscetibilidade encontra-se representada nas Figuras 3.18, 3.19 e 3.20 para os modelos 1, 2 e 3 respectivamente.

Embora a estratégia adotada de representação das zonas de depleção a partir de um ponto centróide possa ignorar o tamanho ou magnitude dos deslizamentos utilizados como referência e, como consequência, gerar um resultado parcial devido às incertezas associadas com a localização de um único ponto, conforme sugerido por Regmi et al. (2010), por outro lado, é necessário considerar também que, a utilização de todas ou um conjunto de unidades de área (*pixels*) correspondentes à área das zonas de depleção, incorreria na inserção de informações redundantes que, por sua vez, poderiam promover incertezas relacionadas à descrição das relações espaciais entre os deslizamentos e os fatores condicionantes e, conseqüentemente, no ajuste dos modelos preditivos gerados, conforme sugerido por Poli & Sterlacchini (2007).

Através da comparação entre seis diferentes formas de representação das cicatrizes de deslizamento, considerando o tamanho e o número de unidades de áreas representantes das cicatrizes, e para duas áreas distintas localizadas na região norte da Itália, Poli & Sterlacchini (2007) destacam que não são evidentes diferenças significativas na distribuição dos valores de suscetibilidade quando adotadas estratégias distintas de representação dos movimentos.

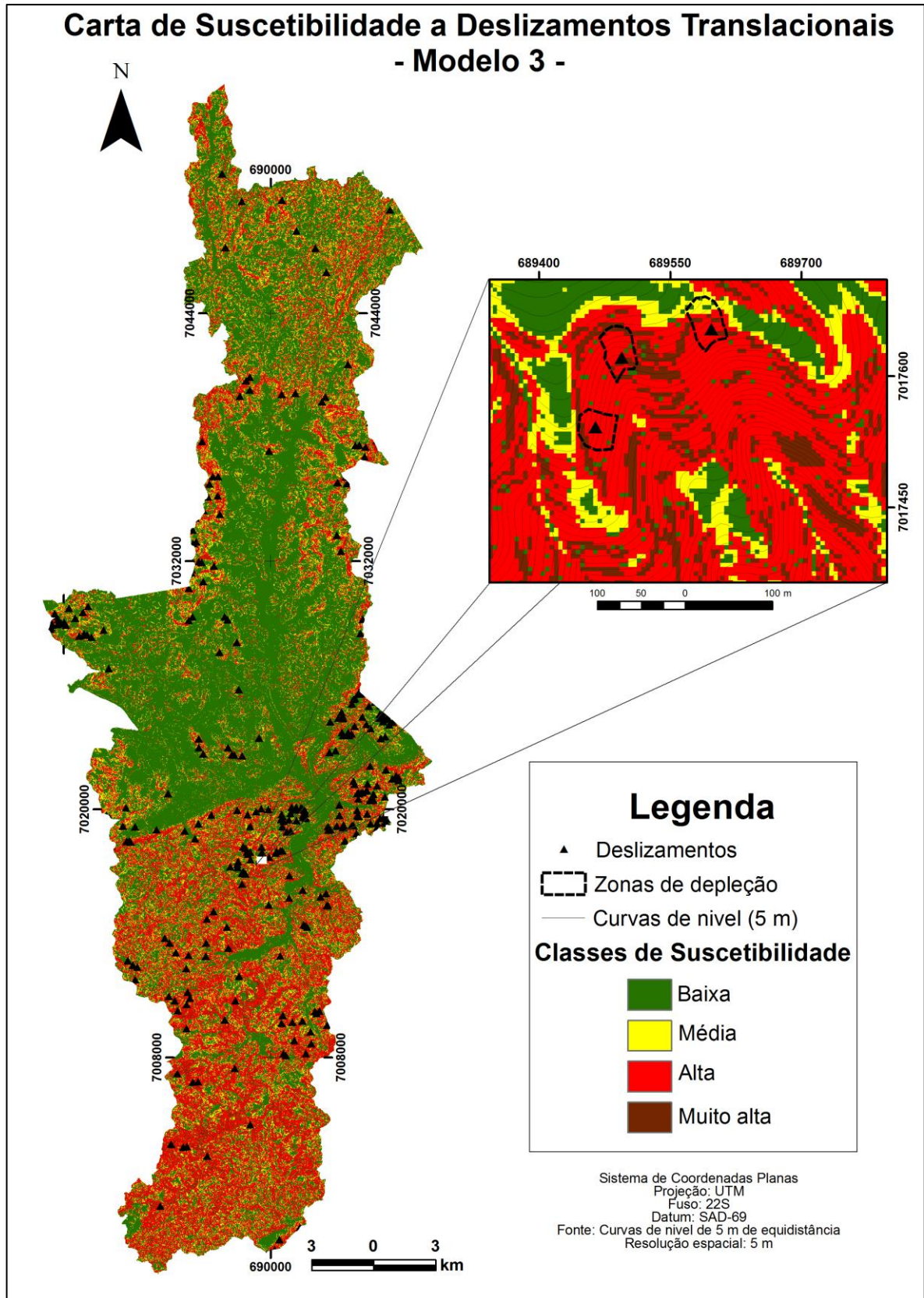


**Figura 3.18** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos translacionais do município de Blumenau (SC). Modelo probabilístico que integra os valores ponderados dos fatores declividade, curvatura horizontal e distâncias de lineamentos morfoestruturais.



**Figura 3.19** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos translacionais do município de Blumenau (SC). Modelo probabilístico que integra os valores ponderados dos fatores declividade e curvatura horizontal.





**Figura 3.20** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos translacionais do município de Blumenau (SC). Modelo probabilístico que integra os valores ponderados dos fatores declividade e curvatura vertical.

A despeito de que possam restar incertezas vinculadas à estratégia de representação a partir de apenas um único ponto centróide, conforme adotado no presente estudo, os resultados relativos à eficiência de predição (Tabela 3.10), que considera as unidades de área (*pixels*) das zonas de depleção classificadas como suscetível, atestam o razoável ajuste final dos modelos selecionados, embora os mesmos ainda devam ser submetidos à análise de validação através da adoção de pontos de treinamento ou da área de zonas de depleção de futuros deslizamentos que porventura venham a ocorrer na área de estudo, processo este também denominado como validação externa, e que contribuirá para complementar a avaliação da eficiência de predição dos modelos ora propostos.

Neuhäuser & Terhorst (2007), Regmi et al. (2010) e Pereira et al. (2012) aferiram a eficiência de predição mediante a seleção aleatória dos pontos de treinamento, utilizando um conjunto deles para a modelagem e o restante para aferir o poder de predição dos modelos gerados. No presente trabalho, em razão do tamanho total da área de estudo e do número de pontos de treinamento disponíveis, optou-se por utilizar todos eles na análise de favorabilidade e aferir a eficiência de predição através da análise da quantidade de unidades de área das zonas de depleção classificadas corretamente.

Apesar de compreender valores razoáveis de AUC<sup>2</sup>, especialmente em virtude do expressivo número de unidades de área utilizadas na análise (30.679), a eficiência de predição dos modelos obtidos no presente trabalho foi menor do que a obtida para outras áreas, conforme reportado por diferentes autores.

Através da aplicação da técnica pesos de evidência para análise da suscetibilidade a deslizamentos, Neuhäuser & Terhorst (2007) obtiveram uma eficiência de predição da ordem de 95%, quando da integração dos valores dos fatores geologia, densidade de lineamentos, curvatura, declividade, distância da escarpa e tipo de solo, para uma área de aproximadamente 500 Km<sup>2</sup>, localizada na região sudoeste da Alemanha.

Dahal et al. (2008) analisaram a suscetibilidade a deslizamentos das microbacias hidrográficas denominadas Moriyuki e Monnyu (< 4 km<sup>2</sup> cada uma), localizadas na ilha de Shikoku no Japão. Através da integração dos valores dos fatores declividade, orientação das encostas, faixas hipsométricas, direção de fluxo, tipo de solo, profundidade do solo, uso do solo e distância de estradas, os autores

relatam uma eficiência de predição da ordem de 80,7% e 77,6%, para as microbacias Moriyuki e Monnyu, respectivamente.

Regmi et al. (2010), analisando a suscetibilidade a deslizamentos em uma bacia hidrográfica de aproximadamente 815 km<sup>2</sup>, localizada no estado do Colorado, nos Estados Unidos da América, obtiveram uma eficiência de predição da ordem de 78,8%, considerando os fatores plasticidade dos solos, declividade, orientação das vertentes, curvatura vertical, razão entre a acumulação e distância do fluxo, distância de cursos hídricos e distância de estradas.

Pereira et al. (2012), estudando a suscetibilidade a deslizamentos no município de Santa Marta de Penaguião, com área aproximada de 70km<sup>2</sup>, através da integração dos temas declividade, índice de umidade e uso do solo, relatam uma eficiência de predição da ordem de 75%.

No que concerne à magnitude dos valores de probabilidade *a posteriori*, os baixos valores absolutos obtidos no presente estudo (Tabela 3.11) justificam-se em decorrência do fato de os mesmos serem influenciados pelo tamanho da área de estudo, a resolução espacial adotada, o número de pontos de treinamento e a quantidade de temas de evidências passíveis de integração, quando da aplicação das formulações bayesianas e da adoção das premissas da técnica pesos de evidência, conforme preconizado por Bonham-Carter (1994). Ainda assim, convém mencionar que, em termos absolutos, o modelo 1 apresentou valores de probabilidade *a posteriori* de até cerca de seis vezes o valor *a priori*, através da integração dos valores de apenas três fatores independentes. Os modelos 2 e 3, que integram os valores de apenas dois fatores independentes, apresentaram valores de probabilidade *a posteriori* de até cerca de cinco e quatro vezes o valor *a priori*, respectivamente.

Se admitido o fato de que os valores de probabilidade não são absolutos, mas representam graus relativos de suscetibilidade, os modelos obtidos fornecem medidas adequadas e válidas para a previsão de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais no município de Blumenau/SC, na escala de 1:25.000 e, segundo o modelo de evento adotado e as condições modeladas, conforme atestam os indicadores de validação (Tabela 3.10).

No que se refere aos resultados dos demais modelos simulados (Tabela 3.9), é possível perceber que a integração dos temas unidades geológicas,

orientação de vertentes, uso do solo e NDVI implicou na violação da condição de independência dos dados, tornando inválidas as proposições que partam da utilização destes temas na composição de modelos preditivos de suscetibilidade. Deste fato decorre a necessidade de aplicação de testes estatísticos pareados para ajudar a elucidar as relações de dependência espacial entre os diferentes temas e contribuir para a composição de modelos preditivos de maior acurácia, a exemplo de Mathew et al. (2007), Neuhäuser & Terhorst (2007), Regmi et al. (2010), Oh e Lee (2011) e Ozdemir (2011).

Em síntese, a partir dos resultados obtidos no presente trabalho e, conforme já mencionado por diferentes autores, a exemplo de Araújo (2004), Mathew et al. (2007), Neuhäuser & Terhorst (2007), Dahal et al. (2008) e Regmi et al. (2010), aspectos positivos e negativos podem ser relacionados à aplicação da técnica pesos de evidência para a previsão de áreas suscetíveis a deslizamentos. Entre os aspectos positivos, convém destacar que: i) trata-se de um método que permite a determinação objetiva das relações espaciais entre os fatores condicionantes e os eventos conhecidos; ii) evita a subjetividade na escolha dos fatores condicionantes; iii) os pesos de múltiplos fatores podem ser combinados; iv) possibilita evitar a combinação de dados de fatores que apresentam alta correlação espacial; v) por se tratar de um método baseado nos dados, os resultados podem ser aprimorados a partir de novas observações e da aquisição de novos dados. No tocante aos aspectos negativos da utilização da técnica pesos de evidência, destaca-se que: i) os pesos das classes dos fatores podem ser subestimados ou superestimados se a área de abrangência delas for muito pequena e se os deslizamentos não apresentarem uma distribuição uniforme na área de estudo; ii) exige a independência condicional entre os dados dos diferentes fatores utilizados na composição dos modelos, limitando o número possível de combinações; iii) os pesos obtidos para diferentes áreas não podem ser comparados entre si e; iv) o método somente é aplicável em áreas onde os eventos são conhecidos.

### 3.4. CONCLUSÕES

Os temas unidades geológicas, distância de lineamentos morfoestruturais, orientação das vertentes, curvatura horizontal, curvatura vertical, declividade, uso do solo e NDVI foram utilizados como evidências para determinar o peso da associação espacial destes fatores em relação à localização de deslizamentos translacionais na área de estudo.

O tema unidades geológicas está representado na área de estudo por 18 classes e, entre elas, 07 atenderam os requisitos de favorabilidade, quais sejam, Complexo São Miguel, Diques Ácidos, as unidades arenosa, conglomerática e siltico-arenosa da Formação Gaspar, Formação Ribeirão Carvalho e a Formação Ribeirão Neisse.

A faixa que varia entre 0 e 300 m de distância de lineamentos morfoestruturais foi a que atendeu os requisitos de favorabilidade na área de estudo.

As encostas voltadas para os quadrantes Sul, Leste e Norte são aquelas que se apresentaram como favoráveis à ocorrência de deslizamentos translacionais na área de estudo.

Com relação à curvatura das encostas, os segmentos lateralmente côncavos (convergentes) e longitudinalmente convexos (divergentes) foram aqueles que atenderam os requisitos de favorabilidade.

A faixa de valores entre 20 e 75° de inclinação é a que se apresentou como favorável à ocorrência de deslizamentos translacionais na área de estudo.

As classes Vegetação Florestal e Vegetação Não-Florestal foram as que atenderam os requisitos de favorabilidade entre aquelas que representam o tema uso do solo. Para o tema NDVI, as classes que se demonstraram favoráveis foram 0,45 a 0,50, 0,50 a 0,55 e de 0,60 a 0,65.

Foram realizados 19 esquemas de integração entre os valores das classes do tema declividade com os demais temas. Contudo, somente três modelos atenderam os requisitos de independência condicional: i) o modelo 1 que integra os valores dos temas declividade, curvatura horizontal e distância de lineamentos morfoestruturais; ii) o modelo 2, que integra os valores dos temas declividade e curvatura horizontal e; iii) o modelo 3, que integra os valores dos temas declividade e curvatura vertical.

Dentre os três modelos selecionados, o modelo 1 foi o que apresentou a maior eficiência de classificação, da ordem de 80%. Com relação à eficiência de predição, os modelos 1 e 3 apresentaram resultado similar, da ordem de 69%, enquanto que o modelo 2 apresentou valor da ordem de 65%.

A partir do modelo 1, foi possível identificar que aproximadamente 34,5% do território do município apresenta algum grau de suscetibilidade a deslizamentos, dos quais cerca de 44,1% compreendem situações de alta a muito alta suscetibilidade. Do modelo 2, depreende-se que cerca de 34,2% do município compreendem situações de suscetibilidade, dos quais cerca de 49,6% correspondem a situações de alta a muito alta suscetibilidade. Já para o modelo 3, cerca de 43,5% do município apresenta algum grau de suscetibilidade, dos quais 65,4% foram classificados como de alta a muito alta suscetibilidade.

Apesar do modelo 1 apresentar maior eficiência de classificação, e um valor intermediário da área de abrangência das classes suscetíveis, o modelo 3, por apresentar uma razoável eficiência de predição, aliada a uma maior área classificada como suscetível, representa a opção mais conservadora entre os três modelos e que, por sua vez, poderá contribuir com maior segurança durante a derivação das informações por ele representadas e sua aplicação nas análises e avaliações de risco relacionadas a deslizamentos e processos correlatos no município de Blumenau/SC.

A despeito de todas as limitações inerentes à aplicação da técnica, a ausência de outros parâmetros importantes, eventuais erros operacionais, e as incertezas associadas à descrição da atuação dos diferentes fatores utilizados e à elaboração e validação dos modelos propostos, conclui-se que o objetivo do trabalho foi alcançado e a hipótese de trabalho foi comprovada.

## **4. ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS ATRAVÉS DA COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO MUNICÍPIO DE BLUMENAU/SC**

### **4.1. INTRODUÇÃO**

Os resultados da análise de suscetibilidade a deslizamentos, obtidos através da aplicação da técnica pesos de evidência, são influenciados pelo tamanho da área de estudo, a resolução espacial adotada, o número de pontos de treinamento e, especialmente, o arranjo espacial das evidências utilizadas (Bonham-Carter 1994, Longley et al. 2013). Assim, a definição da área de abrangência constitui um importante desafio e, neste caso, diferentes critérios podem ser utilizados para delimitação da área de estudo.

Van Westen et al. (2001), Poli & Sterlacchini (2007), Dahal et al. (2008), Vergari et al. (2011), Kayastha et al. (2012) e Prasannakumar & Vijith (2012) reportam resultados de análises aplicadas em bacias hidrográficas.

Neuhäuser & Terhorst (2007) aplicaram a técnica para analisar a suscetibilidade na área correspondente à escarpa jurássica do sudoeste da Alemanha.

Oh & Lee (2011) analisaram a distribuição da suscetibilidade a deslizamentos no território da ilha Panaon, nas Filipinas.

Araújo (2004) e Correia et al. (2013) aplicaram para faixas retangulares de diferentes tamanhos, enquanto que Regmi et al. (2010), Ozdemir (2011) e Armas (2012) apresentam uma delimitação com padrão irregular, sem um critério claro.

Mathew et al. (2007) e Quinn et al. (2010) apresentam os resultados obtidos na análise de suscetibilidade para faixas marginais a empreendimentos lineares.

Pereira et al. (2012) aplicaram a técnica pesos de evidência para análise da suscetibilidade a área correspondente ao território do município de Santa Marta de Penaguião (Portugal).

Considerando a utilização dos modelos de suscetibilidade como úteis ferramentas para contribuir na orientação do uso e ocupação do solo, foi destacado no capítulo 3 que, por conta de diferenças de natureza litoestrutural e variações de modelado, na suscitam a adoção de cautela quanto à interpretação dos resultados da análise de favorabilidade considerando todo o território do município de Blumenau. Como alternativa, as análises de favorabilidade podem ser desenvolvidas

utilizando como critério de compartimentação os principais domínios geomorfológicos representados no território do município.

Considerando a distribuição dos condicionantes de natureza litoestrutural na área de estudo (Basei 1985, Castro et al. 2003, Basei et al. 2011), é possível delimitar dois principais compartimentos geomorfológicos que, por sua vez, correspondem aos domínios morfoestruturais dos Crátons (Cráton Luis Alves) e dos Cinturões Móveis (Cinturão Dom Feliciano) (IBGE, 2009).

Através do contexto exposto, o presente capítulo tem por objetivo reportar os resultados da análise de suscetibilidade a deslizamentos através da aplicação da técnica de modelagem pesos de evidência para os dois principais compartimentos geomorfológicos delimitados no território do município de Blumenau (SC).

## **4.2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.2.1. Obtenção e preparo dos dados**

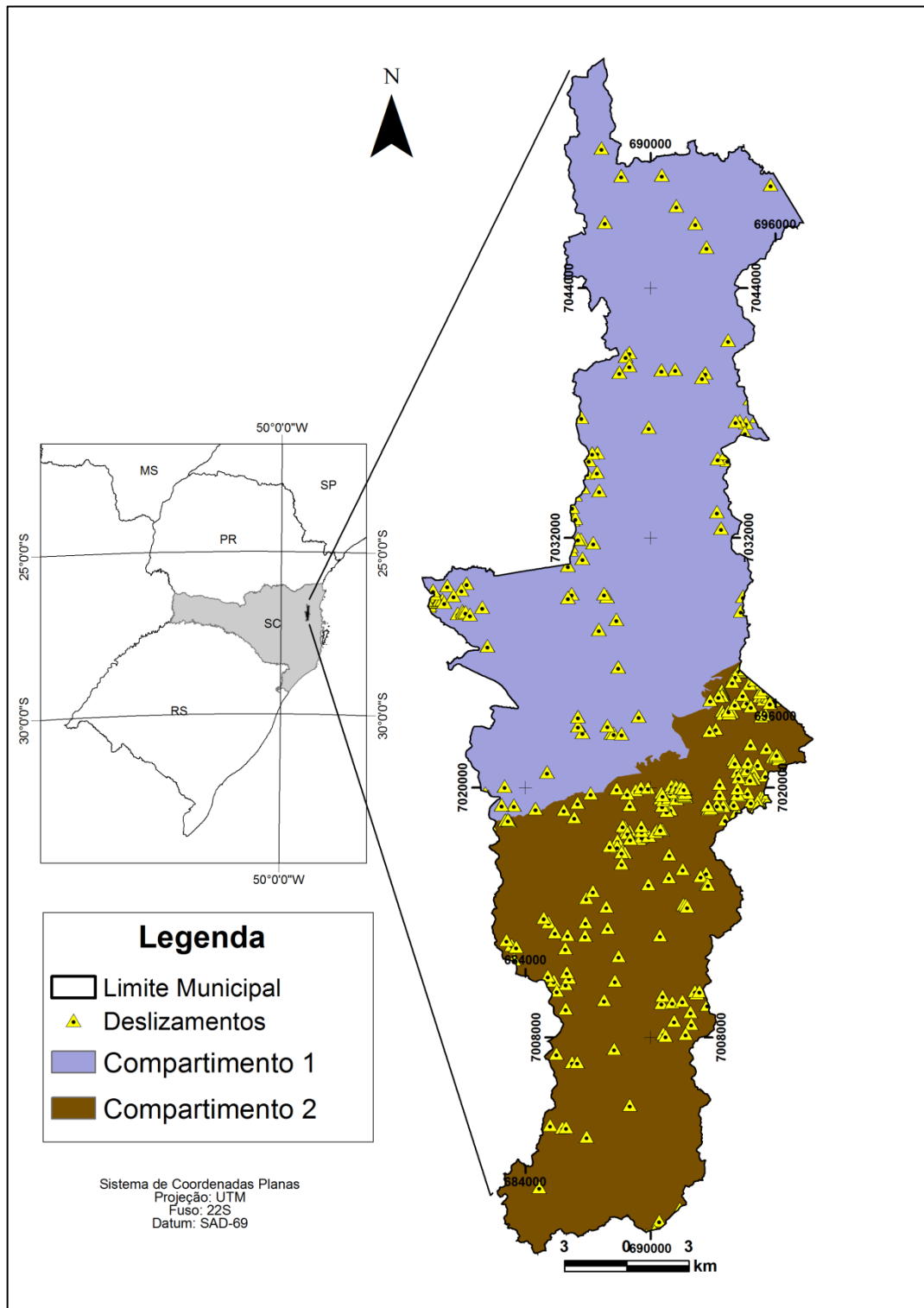
A área de estudo foi segregada em dois compartimentos, relativos aos domínios morfoestruturais do Cráton Luis Alves (compartimento 1) e do Cinturão Dom Feliciano (compartimento 2) no município de Blumenau.

A compartimentação geomorfológica foi realizada considerando os limites entre as unidades do Complexo Granulítico de Santa Catarina (C.G.SC) e as unidades do Grupo Itajaí, resultante de dados de campo obtidos através de mapeamentos realizados pela Diretoria de Geologia, Análise e Riscos Naturais da prefeitura de Blumenau, na escala 1:25.000 (Perdoncini et al. 2013). Com vistas à simplificação da análise, a área correspondente aos terraços e planícies elaboradas pelos depósitos aluvionares inconsolidados oriundos da deposição fluvial, não foi tratada isoladamente e, portanto, incluída no somatório da área dos dois compartimentos delimitados.

Considerando a área de abrangência do C.G.SC na área de estudo, e dos depósitos aluvionares inseridos neste contexto, é possível individualizar a área representada pelo compartimento relativo ao domínio do Cráton Luis Alves, também denominado como compartimento 1 no presente estudo, e que abrange área de 298,7 km<sup>2</sup> (Figura 4.1). Ao sul deste, delimita-se o compartimento 2, relativo ao domínio do Cinturão Dom Feliciano na área de estudo que, incluídos os depósitos



aluvionares inseridos neste contexto, apresenta área de abrangência de 222,2 km<sup>2</sup> (Figura 4.1).



**Figura 4.1** – Distribuição espacial dos compartimentos geomorfológicos representados pelos domínios do Cráton Luis Alves (Compartimento 1) e do Cinturão Dom Feliciano (Compartimento 2) no município de Blumenau/SC.

Os dados geológicos (unidades geológicas e distância de lineamentos negativos), geomorfológicos (orientação de vertentes, curvatura horizontal e vertical e declividade) e de cobertura do solo (uso do solo e NDVI), tratados de maneira isolada para cada compartimento no presente capítulo, derivam da base apresentada no item 3.2.1.

Os deslizamentos utilizados como referência no presente trabalho derivam do inventário reportado no item 3.2.2, dos quais 89 foram selecionados para o compartimento 1 e 205 para o compartimento 2.

As zonas de depleção dos 89 deslizamentos translacionais utilizados como referência para o Compartimento 1, abrangem uma área total aproximada de 0,39 Km<sup>2</sup> (390.750 m<sup>2</sup>) o que, segundo a resolução espacial adotada, corresponde a 15.630 unidades de área (*pixels*). O tamanho médio das zonas de depleção no domínio do Cráton Luis Alves na área de estudo é de 0,004 Km<sup>2</sup> (4.390,4 m<sup>2</sup>), sendo que a menor apresenta área de 203 m<sup>2</sup> e a maior de 18.615 m<sup>2</sup>.

As zonas de depleção dos 205 deslizamentos translacionais utilizados como referência para o compartimento 2, abrange uma área total aproximada de 0,37 Km<sup>2</sup> (370.625 m<sup>2</sup>) o que, segundo a resolução espacial adotada, corresponde a 14.825 unidades de área (*pixels*). O tamanho médio das zonas de depleção no domínio do Cinturão Dom Feliciano é de 0,002 Km<sup>2</sup> (1.807,9 m<sup>2</sup>), sendo que a menor apresenta área de 237 m<sup>2</sup> e a maior de 19.010 m<sup>2</sup>.

#### **4.2.2. Análise dos dados**

No presente trabalho foi utilizada a técnica de modelagem espacial pesos de evidência (*WofE - Weights of Evidence*) (Bonham-Carter et al. 1989, Bonham-Carter 1994). As etapas envolvidas na análise de suscetibilidade através da aplicação da técnica pesos de evidência para cada compartimento analisado isoladamente correspondem às mesmas etapas detalhadas no item 3.2.3.

A definição do tamanho da unidade de área para a análise de favorabilidade obedeceu a resolução espacial derivada da base planialtimétrica utilizada, ou seja, 0,000025 km<sup>2</sup> (25 m<sup>2</sup>) e, como função da abordagem adotada de representação das zonas de depleção através do ponto centróide (89 e 205 pontos de treinamento para os compartimentos 1 e 2, respectivamente) e do tamanho da área de estudo (11.947.687 e 8.884.826 unidades amostrais para os compartimentos 1 e 2,

respectivamente), os valores obtidos para a probabilidade *a priori* foram de 0,000007 para o compartimento 1 e de 0,000023 para o compartimento 2.

Os procedimentos de cálculo dos ponderadores ( $W^+$  e  $W^-$ ) foram aplicados, de maneira isolada para cada compartimento geomorfológico, aos dados geológicos (unidades geológicas e distância de lineamentos negativos), geomorfológicos (orientação de vertentes, curvatura horizontal e vertical e declividade) e de cobertura do solo (uso do solo e NDVI).

A partir da análise de favorabilidade, foram gerados 08 modelos, que compreendem diferentes combinações entre os temas de evidência, com vistas à determinação da probabilidade *a posteriori*, e identificação do resultado: i) que melhor atende aos requisitos de independência dos dados e; ii) com o melhor ajuste quanto à eficiência de classificação e de predição.

A independência condicional entre os temas de evidência de cada compartimento foi avaliada através do emprego de dois testes de análise global, a saber, o teste da Razão de Independência Condicional (CIR – *Conditional Independence Ratio*) (Bonham-Carter 1994) e o teste de Agterberg & Cheng (2002) (ACCIT – *Agterberg & Cheng Conditional Independence Test*), e seu desenvolvimento encontra-se detalhado no item 3.2.3. O teste da hipótese de independência foi conduzido adotando-se um intervalo de confiança de 98% de probabilidade ( $z = 2,33$ ). Assim, o maior valor do indicador “ACCIT” foi utilizado como critério de escolha do modelo que melhor atende aos requisitos de independência.

A avaliação da qualidade de ajuste dos modelos com relação à eficiência de classificação, considerando os pontos de treinamento, e à eficiência de predição, considerando toda a área das zonas de depleção, foi conduzida através da análise da curva da taxa de sucesso (SRC – *Success Rate Curve*), utilizando como referência o valor da área sob a curva (AUC – *Area Under Curve*) para aferir o ajuste do modelo. Os valores de AUC foram calculados conforme sugerido por Sawatzky et al. (2007) e formulações apresentadas no item 3.2.3.

Os modelos que atenderam os requisitos de independência condicional e apresentaram razoáveis indicadores de eficiência de classificação e predição, foram reclassificados, resultando em quatro classes que representam diferentes níveis de suscetibilidade a deslizamentos, quais sejam, baixa, média, alta e muito alta

suscetibilidade. O limite estabelecido para a definição da classe média suscetibilidade foi o valor da probabilidade *a priori*, e para o das demais classes, através de avaliação visual, foram considerados os pontos significativos de inflexão na curva de distribuição dos valores de probabilidade *a posteriori* (*CAPP Curve*) em relação à proporção da área acumulada, conforme sugerido por Sawatzky et al. (2007).

O aplicativo *Arc-Spatial Data Modeller* (ArcSDM), versão 4 (Sawatzky et al. 2007), que opera como extensão livre na plataforma ArcGIS 9.2 (ESRI®), foi utilizado para realizar todas as etapas do processo de análise espacial.

Como forma de orientar a avaliação das diferenças do padrão de distribuição espacial dos valores de probabilidade posterior entre os dois compartimentos foram elaborados histogramas de frequência das fases de relevo, cuja classificação foi adaptada da proposta de EMBRAPA (2006), onde: a classe “Plano e Suave-Ondulado” compreende a faixa de declividade entre 0 e 8% ( $\approx 5^\circ$ ), a classe “Ondulado” de 9 a 20% ( $\approx 11^\circ$ ), “Forte-Ondulado” de 21 a 45% ( $\approx 25^\circ$ ), “Montanhoso” de 45 a 75% ( $\approx 40^\circ$ ) e “Escarpado” com declividades  $> 75\%$ .

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A despeito das relações de dependência espacial entre os diferentes temas, a interpretação dos resultados obtidos como pesos ( $W^+$  e  $W^-$ ) na análise de favorabilidade (Tabelas 4.1 a 4.8) permite depreender que as condições mais favoráveis a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa no compartimento 1 referem-se àquelas onde as encostas apresentam declividade entre 45 e 75°, com solos que derivam dos Gnaisses Granulíticos Luis Alves, voltadas para o quadrante Sul, distando até 200 m de traços de lineamentos, com perfil de curvatura convexo e plano convergente, cobertas por vegetação florestal ou com NDVI entre 0,50 a 0,65.

No caso do compartimento 2 (Tabelas 4.1 a 4.8), as encostas cujos solos derivam de diques ácidos, com plano de curvatura convergente, declividade entre 30 e 35°, voltadas para o quadrante Leste, distando até 300 m de traços de lineamentos, perfil de curvatura convexo e cobertas por vegetação não florestal ou com NDVI entre 0,25 a 0,30 e de 0,40 a 0,50, correspondem às mais favoráveis a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, conforme o modelo de evento e método de análise utilizados.

Conforme apresentado na Tabela 4.1, entre as cinco unidades geológicas representadas no Compartimento 1, somente os Gnaisses Granulíticos Luis Alves atenderam os requisitos de favorabilidade, onde manifestaram-se cerca de 92% dos deslizamentos utilizados como referência deste compartimento.

No Compartimento 2 (Tabela 4.1), das quinze unidades geológicas representadas, cinco delas atenderam os requisitos de favorabilidade, quais sejam, as unidades siltico-arenosa, conglomerática e arenosa da Formação Gaspar, que juntas somam cerca de 55% dos deslizamentos utilizados como referência deste compartimento, a Formação Ribeirão Carvalho com cerca de 85% dos deslizamentos, e os diques ácidos com uma ocorrência registrada.

Conforme mencionado no capítulo 3, somente um dique ácido foi cartografado na área de estudo até o presente momento e que, por sua vez, apresenta área de abrangência de apenas 0,1 Km<sup>2</sup>, justificando a discrepância no resultado dos ponderados obtidos para esta classe. Desta forma, reitera-se que as informações geológicas, até então disponíveis para a área de estudo, são insuficientes em representar a distribuição espacial de todos os demais corpos intrudidos, revelando a necessidade de complementação do mapeamento geológico

(litológico e estrutural), em maior escala, permitindo melhor avaliar os efeitos de importantes descontinuidades litoestruturais na predisposição aos deslizamentos, bem como de seus efeitos decorrentes.

**Tabela 4.1** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das unidades geológicas para cada compartimento geomorfológico delimitado no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^+$	$s(W^+)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
<b>Compartimento 1</b>											
<i>Complexo Granulítico: Gnaisses Granulíticos Luis Alves</i>	204,88	68,59	82	92,13	0,30	0,11	-1,38	0,38	1,68	0,39	4,27
<i>Complexo Granulítico: Ortognaisse Pomerode</i>	41,20	13,79	6	6,74	-0,72	0,41	0,08	0,11	-0,79	0,42	-1,88
<i>Complexo Granulítico: Unidade Máfica-Ultramáfica Barra Velha</i>	3,34	1,12	1	1,12	0,01	1,00	0,00	0,11	0,01	1,01	0,01
<i>Aluvião</i>	46,18	15,46	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Rio Itajaí-açu</i>	3,07	1,03	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Diques básicos</i>	0,05	0,02	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Compartimento 2</b>											
<i>Formação Gaspar: unidade siltico-arenosa</i>	12,84	5,78	41	39,05	1,24	0,16	-0,16	0,08	1,41	0,17	8,05
<i>Formação Gaspar: unidade conglomerática</i>	2,53	1,14	6	5,71	0,94	0,41	-0,02	0,07	0,96	0,41	2,32
<i>Formação Gaspar: unidade arenosa</i>	5,16	2,32	11	10,48	0,84	0,30	-0,03	0,07	0,87	0,31	2,81
<i>Formação Ribeirão Carvalho</i>	43,90	19,76	89	84,76	0,79	0,11	-0,35	0,09	1,14	0,14	8,07
<i>Formação Ribeirão do Bode</i>	28,45	12,80	14	13,33	-0,63	0,27	0,07	0,07	-0,69	0,28	-2,51
<i>Formação Ribeirão Neisse</i>	21,65	9,74	17	16,19	-0,16	0,24	0,02	0,07	-0,18	0,25	-0,70
<i>Formação Nova Rússia</i>	12,76	5,74	2	1,90	-1,77	0,71	0,05	0,07	-1,82	0,71	-2,56
<i>Formação Nova Rússia: unidade conglomerática</i>	0,75	0,34	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Complexo São Miguel</i>	19,52	8,78	17	16,19	-0,06	0,24	0,01	0,07	-0,06	0,25	-0,25
<i>Grupo Brusque</i>	57,74	25,98	6	5,71	-2,18	0,41	0,27	0,07	-2,45	0,41	-5,92
<i>Diques ácidos</i>	0,09	0,04	1	0,95	2,43	1,00	0,00	0,07	2,44	1,00	2,43
<i>Granito Faxinal</i>	1,91	0,86	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Granito Guabiruba</i>	1,41	0,63	1	0,95	-0,26	1,00	0,00	0,07	-0,26	1,00	-0,26
<i>Diques básicos</i>	0,01	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Aluvião</i>	11,83	5,32	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Rio Itajaí-açu</i>	1,64	0,74	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Onde:**  $W^+$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^+)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.

A natureza relativa dos valores obtidos através da abordagem bayesiana impede a avaliação de diferenças estatísticas para os indicadores de favorabilidade entre as áreas (Bonham-Carter et al. 1989, Bonham-Carter 1994, Poli & Sterlacchini 2007).

Contudo, considerando o fato de que há equivalência com relação à fonte de obtenção dos dados geológicos (lineamentos), topográficos e de cobertura e uso do solo de ambas as áreas, que os compartimentos apresentam tamanho aproximado e sujeitos às mesmas condições climáticas, torna-se razoável a avaliação comparativa no que tange às diferenças de respostas expressas na análise de favorabilidade (Tabelas 4.2 a 4.8) e no ajuste dos modelos preditivos (Tabelas 4.9 e 4.10).

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das faixas de distância de lineamentos morfoestruturais de cada compartimento geomorfológico. Conforme os resultados apresentados, é possível perceber que, no Compartimento 1, a influência exercida por lineamentos morfoestruturais manifesta-se até a distância de 200 m e, no Compartimento 2, esta influência se processa até a distância de 300 m.

**Tabela 4.2** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das faixas de distância de lineamentos morfoestruturais de cada compartimento geomorfológico delimitado no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^*$	$s(W^*)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
<b>Compartimento 1</b>											
0 a 50 m	35,31	11,82	10	11,24	-0,05	0,32	0,01	0,11	-0,06	0,34	-0,17
50 a 100 m	70,41	23,57	21	23,60	0,00	0,22	0,00	0,12	0,00	0,25	0,01
100 a 150 m	104,13	34,86	37	41,57	0,18	0,16	-0,11	0,14	0,28	0,22	1,32
150 a 200 m	135,81	45,47	51	57,30	0,23	0,14	-0,24	0,16	0,48	0,21	2,22
200 a 250 m	164,50	55,07	56	62,92	0,13	0,13	-0,19	0,17	0,33	0,22	1,48
250 a 300 m	189,56	63,46	66	74,16	0,16	0,12	-0,35	0,21	0,50	0,24	2,07
300 a 350 m	210,85	70,59	72	80,90	0,14	0,12	-0,43	0,24	0,57	0,27	2,11
350 a 400 m	228,87	76,62	77	86,52	0,12	0,11	-0,55	0,29	0,67	0,31	2,16
400 a 450 m	243,96	81,67	80	89,89	0,10	0,11	-0,59	0,33	0,69	0,35	1,96
450 a 900 m	295,86	99,05	89	100,00	0,01	0,11	-4,43	10,00	4,44	10,00	0,44
900 a 1350 m	298,68	99,99	89	100,00	0,00	0,11	0,77	10,00	-0,77	10,00	-0,08
> 1350 m	298,69	100,00	89	100,00	0,00	0,11	11,81	14,14	-11,81	14,14	-0,83
<b>Compartimento 2</b>											
0 a 50 m	33,34	15,01	26	12,68	-0,17	0,20	0,03	0,07	-0,20	0,21	-0,93
50 a 100 m	64,51	29,03	56	27,32	-0,06	0,13	0,02	0,08	-0,09	0,16	-0,54
100 a 150 m	92,49	41,63	93	45,37	0,09	0,10	-0,07	0,09	0,15	0,14	1,08
150 a 200 m	116,47	52,42	119	58,05	0,10	0,09	-0,13	0,11	0,23	0,14	1,61
200 a 250 m	136,48	61,42	140	68,29	0,11	0,08	-0,20	0,12	0,30	0,15	2,01
250 a 300 m	153,23	68,96	157	76,59	0,10	0,08	-0,28	0,14	0,39	0,16	2,34
300 a 350 m	167,06	75,18	164	80,00	0,06	0,08	-0,21	0,16	0,28	0,17	1,58
350 a 400 m	177,86	80,04	169	82,44	0,03	0,08	-0,13	0,17	0,16	0,18	0,85
400 a 450 m	186,37	83,87	178	86,83	0,03	0,08	-0,20	0,19	0,23	0,21	1,14
450 a 900 m	218,45	98,31	198	96,59	-0,02	0,07	0,73	0,38	-0,74	0,38	-1,93
900 a 1350 m	222,10	99,96	204	99,51	0,00	0,07	4,07	1,00	-4,08	1,00	-4,06
> 1350 m	222,20	100,00	205	100,00	0,00	0,07	10,68	14,14	-10,68	14,14	-0,76

Onde:  $W^*$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^*)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de orientação das encostas de cada compartimento geomorfológico. A partir dos resultados obtidos, depreende-se que as vertentes voltadas para o quadrante Sul apresentam-se como favoráveis no Compartimento 1, ao passo que aquelas direcionadas para o quadrante Leste traduzem-se como favoráveis à ocorrência de deslizamentos no Compartimento 2.

**Tabela 4.3** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de orientação das encostas de cada compartimento geomorfológico delimitado no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	W*	s(W*)	W	s(W)	C	s(C)	C/s(C)
<b>Compartimento 1</b>											
Plano	19,08	6,39	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Norte	67,59	22,63	15	5,02	-0,29	0,26	0,07	0,12	-0,37	0,28	-1,29
Leste	77,56	25,96	26	8,70	0,12	0,20	-0,04	0,13	0,16	0,23	0,70
Sul	64,54	21,61	33	11,05	0,54	0,17	-0,22	0,13	0,76	0,22	3,46
Oeste	69,94	23,41	15	5,02	-0,33	0,26	0,08	0,12	-0,41	0,28	-1,45
<b>Compartimento 2</b>											
Plano	6,55	2,95	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Norte	62,73	28,23	65	31,71	0,12	0,12	-0,05	0,08	0,17	0,15	1,10
Leste	55,53	24,99	63	30,73	0,21	0,13	-0,08	0,08	0,29	0,15	1,89
Sul	45,81	20,62	46	22,44	0,08	0,15	-0,02	0,08	0,11	0,17	0,64
Oeste	51,51	23,18	31	15,12	-0,43	0,18	0,10	0,08	-0,53	0,20	-2,71

**Onde:** W\* = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo); s(W\*) = desvio padrão do peso positivo; W = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo); s(W) = desvio padrão do peso negativo; C = contraste; s(C) = desvio padrão do contraste e; C/s(C) = valor de confiança.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de curvatura horizontal das encostas de cada compartimento geomorfológico. Por sua vez, a Tabela 4.5 apresenta os resultados da análise de favorabilidade das classes de curvatura vertical.

**Tabela 4.4** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de curvatura horizontal das encostas de cada compartimento geomorfológico delimitado no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	W*	s(W*)	W	s(W)	C	s(C)	C/s(C)
<b>Compartimento 1</b>											
Convergente	99,94	33,46	35	39,33	0,16	0,17	-0,09	0,14	0,25	0,22	1,17
Retilínea	60,05	20,10	11	12,36	-0,49	0,30	0,09	0,11	-0,58	0,32	-1,80
Divergente	138,71	46,44	43	48,31	0,04	0,15	-0,04	0,15	0,08	0,21	0,35
<b>Compartimento 2</b>											
Convergente	80,16	36,08	124	60,49	0,52	0,09	-0,48	0,11	1,00	0,14	6,98
Retilínea	27,69	12,46	6	2,93	-1,45	0,41	0,10	0,07	-1,55	0,41	-3,75
Divergente	114,27	51,43	75	36,59	-0,34	0,12	0,27	0,09	-0,61	0,15	-4,19

**Onde:** W\* = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo); s(W\*) = desvio padrão do peso positivo; W = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo); s(W) = desvio padrão do peso negativo; C = contraste; s(C) = desvio padrão do contraste e; C/s(C) = valor de confiança.



Ao comparar os resultados entre os compartimentos (Tabelas 4.4 e 4.5), a despeito de diferenças na magnitude dos valores dos pesos, é possível notar que as curvaturas horizontal e vertical desempenham papel similar no favorecimento à ocorrência de deslizamentos, independente da natureza litoestrutural dos materiais envolvidos. Em ambos os compartimentos, as encostas lateralmente convergentes e longitudinalmente convexas são àquelas que atendem os requisitos de favorabilidade.

**Tabela 4.5** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de curvatura vertical das encostas de cada compartimento geomorfológico delimitado no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^*$	$s(W^*)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
<b>Compartimento 1</b>											
Convexa	126,01	42,19	48	53,93	0,25	0,14	-0,23	0,16	0,47	0,21	2,22
Retilínea	51,43	17,22	4	4,49	-1,34	0,50	0,14	0,11	-1,49	0,51	-2,90
Côncava	121,25	40,59	37	41,57	0,02	0,16	-0,02	0,14	0,04	0,22	0,19
<b>Compartimento 2</b>											
Convexa	104,59	47,07	105	51,22	0,08	0,10	-0,08	0,10	0,17	0,14	1,18
Retilínea	21,79	9,81	8	3,90	-0,92	0,35	0,06	0,07	-0,99	0,36	-2,73
Côncava	95,74	43,09	92	44,88	0,04	0,10	-0,03	0,09	0,07	0,14	0,51

**Onde:**  $W^*$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^*)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de declividade das encostas de cada compartimento geomorfológico. Conforme os resultados obtidos, é possível notar que a declividade apresentou uma resposta ligeiramente diferente entre os compartimentos, sendo que a favorabilidade está expressa na faixa que varia de 20 a 75° no Compartimento 1 e de 25 a 75° no Compartimento 2.

Através das medidas de associação espacial entre os deslizamentos e diferentes padrões de cobertura e uso do solo (Tabela 4.7), são também reveladas diferenças das respostas de favorabilidade entre os compartimentos geomorfológicos. Segundo os dados, as áreas cobertas por vegetação florestal no domínio do Cráton Luis Alves são àquelas que, através da abordagem utilizada, apresentam-se como favoráveis à ocorrência de deslizamentos translacionais, enquanto que, no domínio do Cinturão Dom Feliciano, as áreas com cobertura vegetal não-florestal é que apresentam-se como favoráveis.

**Tabela 4.6** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de declividade das encostas de cada compartimento geomorfológico delimitado no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^*$	$s(W^*)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
<b>Compartimento 1</b>											
0 a 5°	70,05	23,45	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 a 10°	40,68	13,62	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 a 15°	46,21	15,47	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15 a 20°	49,23	16,48	8	8,99	-0,61	0,35	0,09	0,11	-0,69	0,37	-1,87
20 a 25°	42,27	14,15	22	24,72	0,56	0,21	-0,13	0,12	0,69	0,25	2,80
25 a 30°	27,73	9,28	20	22,47	0,88	0,22	-0,16	0,12	1,04	0,25	4,10
30 a 35°	13,92	4,66	20	22,47	1,57	0,22	-0,21	0,12	1,78	0,25	7,01
35 a 40°	5,69	1,90	13	14,61	2,04	0,28	-0,14	0,11	2,18	0,30	7,25
40 a 45°	2,00	0,67	3	3,37	1,61	0,58	-0,03	0,11	1,64	0,59	2,80
45 a 75°	0,90	0,30	3	3,37	2,41	0,58	-0,03	0,11	2,44	0,59	4,16
≥75°	0,01	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Compartimento 2</b>											
0 a 5°	18,55	8,35	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 a 10°	11,54	5,19	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 a 15°	19,17	8,63	3	1,46	-1,77	0,58	0,08	0,07	-1,85	0,58	-3,18
15 a 20°	30,18	13,58	17	8,29	-0,49	0,24	0,06	0,07	-0,55	0,25	-2,18
20 a 25°	40,34	18,16	40	19,51	0,07	0,16	-0,02	0,08	0,09	0,18	0,50
25 a 30°	40,48	18,22	52	25,37	0,33	0,14	-0,09	0,08	0,42	0,16	2,63
30 a 35°	30,52	13,73	51	24,88	0,59	0,14	-0,14	0,08	0,73	0,16	4,53
35 a 40°	17,85	8,03	21	10,24	0,24	0,22	-0,02	0,07	0,27	0,23	1,16
40 a 45°	8,47	3,81	14	6,83	0,58	0,27	-0,03	0,07	0,61	0,28	2,22
45 a 75°	5,01	2,25	7	3,41	0,42	0,38	-0,01	0,07	0,43	0,38	1,11
≥75°	0,02	0,01	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Onde:**  $W^*$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^*)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.

**Tabela 4.7** – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de uso do solo de cada compartimento geomorfológico delimitado no município de Blumenau (SC), Brasil.

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^*$	$s(W^*)$	$W$	$s(W)$	$C$	$s(C)$	$C/s(C)$
<b>Compartimento 1</b>											
VEGETAÇÃO FLORESTAL	104,7	35,06	58	65,17	0,62	0,13	-0,62	0,18	1,24	0,22	5,59
SOLO EXPOSTO	1,3	0,45	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VEGETAÇÃO NÃO-FLORESTAL	80,2	26,86	28	31,46	0,16	0,19	-0,07	0,13	0,22	0,23	0,98
ÁREA URBANIZADA	95,4	31,93	3	3,37	-2,25	0,58	0,35	0,11	-2,60	0,59	-4,42
HIDROGRAFIA	17,0	5,71	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Compartimento 2</b>											
VEGETAÇÃO FLORESTAL	158,7	71,40	131	63,90	-0,11	0,09	0,23	0,12	-0,35	0,15	-2,37
SOLO EXPOSTO	0,2	0,10	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VEGETAÇÃO NÃO-FLORESTAL	30,5	13,74	67	32,68	0,87	0,12	-0,25	0,09	1,11	0,15	7,48
ÁREA URBANIZADA	27,0	12,14	6	2,93	-1,42	0,41	0,10	0,07	-1,52	0,41	-3,68
HIDROGRAFIA	5,7	2,58	1	0,49	-1,67	1,00	0,02	0,07	-1,69	1,00	-1,68

**Onde:**  $W^*$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^*)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W)$  = desvio padrão do peso negativo;  $C$  = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.

**Tabela 4.8 – Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes do NDVI de cada compartimento geomorfológico delimitado no município de Blumenau (SC), Brasil.**

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%	PONTOS DE TREINAMENTO	%	$W^+$	$s(W^+)$	$W^-$	$s(W^-)$	C	$s(C)$	$C/s(C)$
<b>Compartimento 1</b>											
-0,60 a -0,55	0,01	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,55 a -0,50	0,23	0,08	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,50 a -0,45	0,52	0,17	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,45 a -0,40	0,18	0,06	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,40 a -0,35	0,16	0,05	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,35 a -0,30	0,13	0,04	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,30 a -0,25	0,12	0,04	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,25 a -0,20	0,09	0,03	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,20 a -0,15	0,18	0,06	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,15 a -0,10	0,64	0,21	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,10 a -0,05	1,33	0,44	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,05 a 0,00	6,12	2,05	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00 a 0,05	5,72	1,91	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05 a 0,10	8,44	2,83	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10 a 0,15	9,14	3,06	1	1,12	-1,00	1,00	0,02	0,11	-1,02	1,01	-1,02
0,15 a 0,20	10,00	3,35	1	1,12	-1,09	1,00	0,02	0,11	-1,11	1,01	-1,11
0,20 a 0,25	10,68	3,58	1	1,12	-1,16	1,00	0,03	0,11	-1,18	1,01	-1,18
0,25 a 0,30	11,99	4,02	2	2,25	-0,58	0,71	0,02	0,11	-0,60	0,72	-0,84
0,30 a 0,35	14,18	4,75	3	3,37	-0,34	0,58	0,01	0,11	-0,36	0,59	-0,61
0,35 a 0,40	20,30	6,80	1	1,12	-1,80	1,00	0,06	0,11	-1,86	1,01	-1,85
0,40 a 0,45	25,27	8,46	6	6,74	-0,23	0,41	0,02	0,11	-0,25	0,42	-0,58
0,45 a 0,50	39,43	13,20	9	10,11	-0,27	0,33	0,04	0,11	-0,30	0,35	-0,86
0,50 a 0,55	48,91	16,37	19	21,35	0,27	0,23	-0,06	0,12	0,33	0,26	1,26
0,55 a 0,60	59,72	19,99	28	31,46	0,45	0,19	-0,15	0,13	0,61	0,23	2,66
0,60 a 0,65	24,11	8,07	18	20,22	0,92	0,24	-0,14	0,12	1,06	0,26	4,02
0,65 a 0,70	1,09	0,36	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,70 a 0,75	0,01	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Compartimento 2</b>											
-0,65 a -0,60	0,01	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,60 a -0,55	0,05	0,02	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,55 a -0,50	0,30	0,13	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,50 a -0,45	0,34	0,15	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,45 a -0,40	0,10	0,05	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,40 a -0,35	0,11	0,05	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,35 a -0,30	0,08	0,04	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,30 a -0,25	0,08	0,04	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,25 a -0,20	0,05	0,02	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,20 a -0,15	0,07	0,03	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,15 a -0,10	0,21	0,09	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,10 a -0,05	0,45	0,20	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,05 a 0,00	2,58	1,16	1	0,49	-0,87	1,00	0,01	0,07	-0,87	1,00	-0,87
0,00 a 0,05	1,65	0,74	2	0,98	0,27	0,71	0,00	0,07	0,28	0,71	0,39
0,05 a 0,10	2,46	1,11	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10 a 0,15	2,86	1,29	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,15 a 0,20	3,62	1,63	5	2,44	0,40	0,45	-0,01	0,07	0,41	0,45	0,91
0,20 a 0,25	4,19	1,88	3	1,46	-0,25	0,58	0,00	0,07	-0,26	0,58	-0,44
0,25 a 0,30	5,32	2,40	8	3,90	0,49	0,35	-0,02	0,07	0,50	0,36	1,40
0,30 a 0,35	6,44	2,90	5	2,44	-0,17	0,45	0,00	0,07	-0,18	0,45	-0,39
0,35 a 0,40	10,72	4,82	11	5,37	0,11	0,30	-0,01	0,07	0,11	0,31	0,36
0,40 a 0,45	16,60	7,47	20	9,76	0,27	0,22	-0,03	0,07	0,29	0,24	1,24
0,45 a 0,50	34,58	15,56	47	22,93	0,39	0,15	-0,09	0,08	0,48	0,17	2,88
0,50 a 0,55	45,32	20,40	44	21,46	0,05	0,15	-0,01	0,08	0,06	0,17	0,38
0,55 a 0,60	64,39	28,98	46	22,44	-0,26	0,15	0,09	0,08	-0,34	0,17	-2,06
0,60 a 0,65	19,40	8,73	13	6,34	-0,32	0,28	0,03	0,07	-0,35	0,29	-1,21
0,65 a 0,70	0,14	0,07	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Onde:**  $W^+$  = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo);  $s(W^+)$  = desvio padrão do peso positivo;  $W^-$  = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo);  $s(W^-)$  = desvio padrão do peso negativo; C = contraste;  $s(C)$  = desvio padrão do contraste e;  $C/s(C)$  = valor de confiança.

Diferenças das respostas de favorabilidade entre os compartimentos geomorfológicos também foram reveladas para o tema que representa os padrões de cobertura do solo através do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Conforme demonstrado na Tabela 4.8, a faixa de valores entre 0,50 e 0,65 foi a que atendeu os requisitos de favorabilidade no Compartimento 1, enquanto que, no Compartimento 2, a favorabilidade está expressa para os padrões de cobertura do solo representados pelos valores de 0,25 a 0,30 e de 0,40 a 0,50.

Para solos rasos, onde a superfície de ruptura muitas vezes coincide com a zona de raízes, é esperado que a contribuição da vegetação florestal, sobretudo no que se refere ao reforço mecânico, ganho de coesão pela ação das raízes e regularização dos fluxos hídricos (de superfície e de subsuperfície), suplante os efeitos decorrentes do aumento da força-peso como agente solicitante (Fiori e Carmignani, 2009). Este pressuposto pode ser aplicado para elucidar as respostas de favorabilidade obtidas para a cobertura vegetal não florestal no domínio do Compartimento 2, onde, de maneira geral, predominam solos de menor espessura.

A mesma condição pode não ser verdade em solos mais profundos, quando a superfície de ruptura localiza-se em profundidades onde a contribuição da vegetação florestal como agente resistente se faz limitada ou inexistente, o que pode ser previsto para o contexto do Cráton Luis Alves onde predominam, de maneira geral, espessos mantos de regolito.

Lima et al. (2010) estudaram a relação espacial entre a ocorrência de deslizamentos translacionais e os diferentes padrões de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Braço do Baú, com área de 49 Km<sup>2</sup>, inserida no domínio do Cráton Luis Alves e, portanto, em condições morfoclimáticas similares das do Compartimento 1. Apesar de no citado trabalho não ter sido empregada a abordagem bayesiana, os autores relatam elevada associação espacial entre as cicatrizes de deslizamento (considerando não só a zona de depleção, mas também a área afetada pela mobilização de material) e as áreas cobertas por vegetação florestal. Os autores não atribuem relação causal entre a presença de vegetação florestal e a ocorrência de deslizamentos, e chamam atenção para o fato de que as áreas cobertas por floresta se encontram, quase que exclusivamente, em encostas e de elevada declividade.

Os resultados obtidos através da análise global de independência espacial dos diferentes modelos elaborados no contexto do Compartimento 1 (Tabela 4.9), revelam a violação da condição de independência através da integração dos fatores uso do solo ou NDVI com os demais fatores, indicando, neste caso, que as áreas cobertas por vegetação florestal mantêm forte associação espacial com os demais fatores considerados e corroborando com a ideia de que, apesar dos efeitos positivos promovidos pela cobertura florestal sobre a estabilidade das encostas, eles não foram, para os casos analisados, suficientemente significativos para eliminar os efeitos de outros fatores que, supostamente, seriam preponderantes no controle dos movimentos utilizados como modelo de evento, conforme proposto por Rodrigues (2002).

No intuito de identificar os modelos que apresentaram ajustes razoáveis, com relação ao atendimento da condição de independência dos dados e quanto à eficiência de classificação e de predição, foram simuladas 08 combinações de integração dos pesos das classes de declividade com aqueles obtidos para os demais temas de evidência (Tabela 4.9).

No que concerne à condição de independência dos modelos gerados, no Compartimento 1 (Tabela 4.9) quatro deles atenderam aos requisitos de independência, conquanto, entre eles, o modelo 1, que integra os dados dos temas curvatura horizontal e declividade foi o que apresentou o maior valor para o indicador ACCIT (14,61) e, o modelo 4, que integra os dados dos temas distância de lineamentos morfoestruturais, orientação de vertentes, curvatura horizontal e declividade foi o que apresentou o menor valor para o indicador ACCIT (5,21).

No compartimento 2, o modelo 8 é o único que fere significativamente as premissas de independência condicional (Tabela 4.9). Os demais sete modelos apresentam algum grau de independência e, tal qual no Compartimento 1, o modelo 1 que integra apenas os valores dos temas curvatura horizontal e declividade, é o que demonstra o maior valor de ACCIT (26,51). O modelo 7, que integra os dados dos temas distância de lineamentos, orientação das vertentes, curvatura horizontal, declividade e uso do solo foi o que apresentou o menor valor de ACCIT (2,43), embora atenda os requisitos de independência.

**Tabela 4.9** – Relação dos esquemas de integração dos diferentes temas de evidência e resultados da análise global de independência espacial dos dados, dos modelos de suscetibilidade de cada compartimento geomorfológico delimitado para o município de Blumenau(SC).

Nº	MODELOS	T	(T-n)	s(T)	ACCIT	CIR
<b>Compartimento 1</b>						
1	4 + 6	94.80	5.80	8.76	14.61	0.94
2	2 + 4 + 6	94.40	5.40	8.40	14.17	0.94
3	5 + 6	100.20	11.20	9.51	10.96	0.89
4	2 + 3 + 4 + 6	96.40	7.40	5.41	5.21	0.92
5	2 + 4 + 6 + 8	114.00	25.00	6.14	-10.69	0.78
6	3 + 4 + 6 + 8	118.60	29.60	4.31	-19.56	0.75
7	2 + 3 + 4 + 6 + 7	127.70	38.70	6.22	-24.21	0.7
8	1 + 2 + 3 + 4 + 6 + 7	145.60	56.60	6.74	-40.90	0.61
<b>Compartimento 2</b>						
1	4 + 6	210.90	5.90	13.91	26.51	0.97
2	5 + 6	209.00	4.00	12.75	25.71	0.98
3	2 + 4 + 6	210.40	5.40	11.44	21.26	0.97
4	2 + 3 + 4 + 6	210.60	5.60	7.00	10.71	0.97
5	2 + 4 + 6 + 8	211.00	6.00	6.74	9.70	0.97
6	3 + 4 + 6 + 8	209.00	4.00	4.61	6.74	0.98
7	2 + 3 + 4 + 6 + 7	215.80	10.80	5.68	2.43	0.95
8	1 + 2 + 3 + 4 + 6 + 7	219.80	14.80	3.71	-6.16	0.93

1 – Unidades Geológicas; 2 – Lineamentos; 3 – Orientação de vertente; 4 – Curvatura horizontal; 5 – Curvatura vertical; 6 – Declividade; 7 – Uso do Solo e; 8 – NDVI; T – Somatório dos valores de probabilidade a posteriori; n – Número de pontos de treinamento; s(T) – Desvio padrão de T; ACCIT – Valor do teste Aterberg & Cheng de independência condicional; CIR – Razão de independência condicional.

Com relação à validação dos modelos, os resultados obtidos através das análises de eficiência de classificação e de predição demonstram respostas diferenciadas dos modelos entre os dois compartimentos (Tabela 4.10 e Figuras 4.2a, 4.2b, 4.3a e 4.3b).

Para o Compartimento 1, conforme demonstrado na Tabela 4.10 e ilustrado nas Figuras 4.2a e 4.3a, o modelo 4 foi o que apresentou o melhor ajuste e que, por sua vez, resulta da combinação que considera os dados dos temas distância de lineamentos morfoestruturais, orientação das encostas, curvatura horizontal e declividade. Embora tenha apresentado o menor valor positivo de ACCIT, este modelo apresentou uma eficiência de classificação que resulta em um valor da área sob a curva (AUC<sup>1</sup>) da ordem de 0,87, combinado com uma eficiência de predição (AUC<sup>2</sup>) de 0,83. Os demais modelos apresentaram valores próximos, tanto com

relação à eficiência de classificação (0,86), quanto à de predição (entre 0,80 e 0,81). Este modelo foi também o que apresentou a maior proporção de pontos de treinamento (92%) e da área das zonas de depleção (85%) classificados corretamente, atestando seu razoável ajuste final.

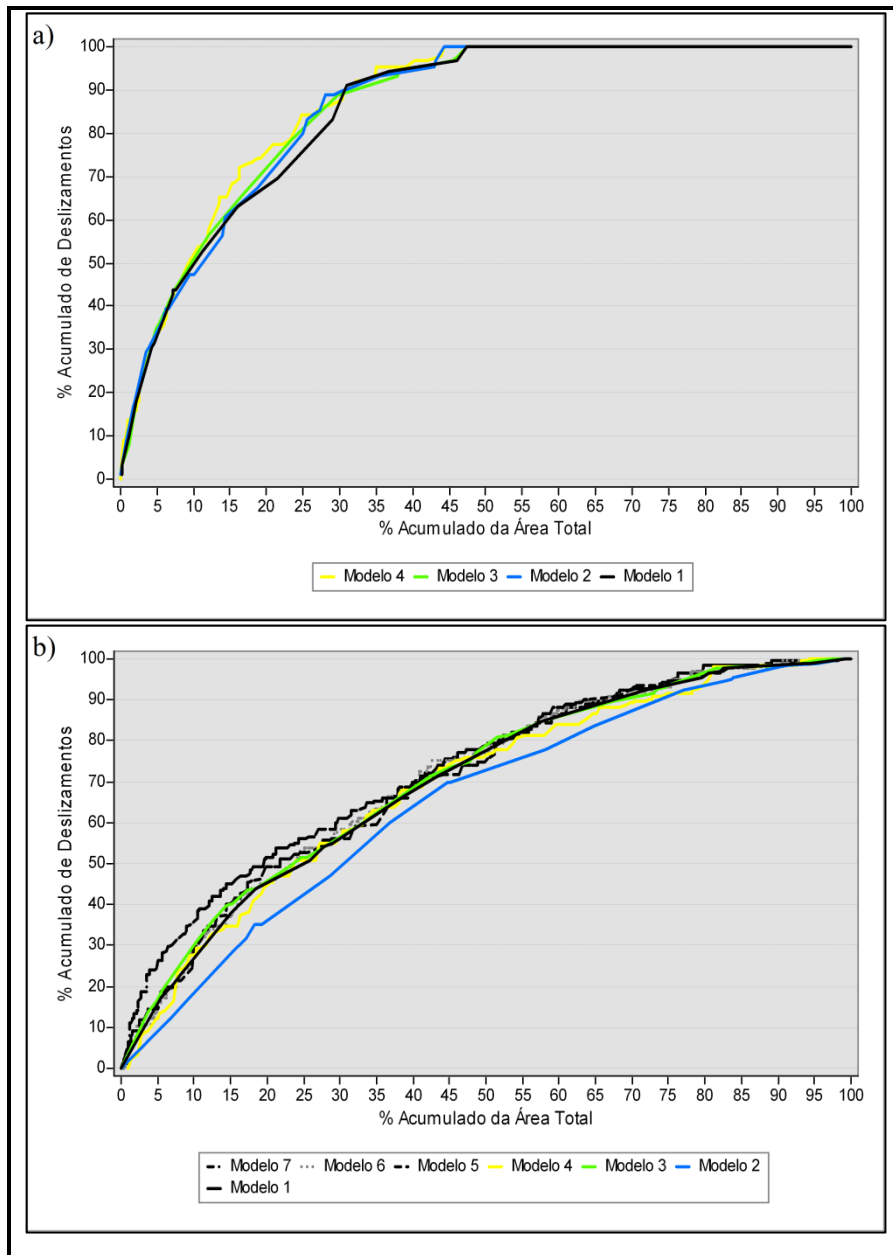
**Tabela 4.10** - Indicadores de eficiência de classificação e predição dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos translacionais que atenderam os requisitos de independência condicional, para cada compartimento geomorfológico delimitado para o território de Blumenau (SC), Brasil.

MODELOS	TEMAS COMBINADOS	AUC <sup>1</sup>	% <sup>1</sup>	AUC <sup>2</sup>	% <sup>2</sup>
<b>Compartimento 1</b>					
1	4 + 6	0.86	91	0.80	83
2	2 + 4 + 6	0.86	90	0.81	85
3	5 + 6	0.86	89	0.80	82
4	2 + 3 + 4 + 6	0.87	92	0.83	85
<b>Compartimento 2</b>					
1	4 + 6	0.70	81	0.58	73
2	5 + 6	0.65	70	0.54	57
3	2 + 4 + 6	0.70	76	0.59	63
4	2 + 3 + 4 + 6	0.69	70	0.64	58
5	2 + 4 + 6 + 8	0.71	70	0.66	59
6	3 + 4 + 6 + 8	0.71	68	0.68	59
7	2 + 3 + 4 + 6 + 7	0.73	69	0.70	60

2 – Lineamentos; 3 – Orientação de vertente; 4 – Curvatura horizontal; 5 – Curvatura vertical; 6 – Declividade; 7 – Uso do Solo e; 8 – NDVI; AUC<sup>1</sup> – Valor da área sob a curva considerando os pontos de treinamento; %<sup>1</sup> – Frequência relativa dos pontos de treinamento classificados corretamente; AUC<sup>2</sup> – Valor da área sob a curva considerando a área total das zonas de depleção; %<sup>2</sup> – Proporção da área total das zonas de depleção classificada corretamente.

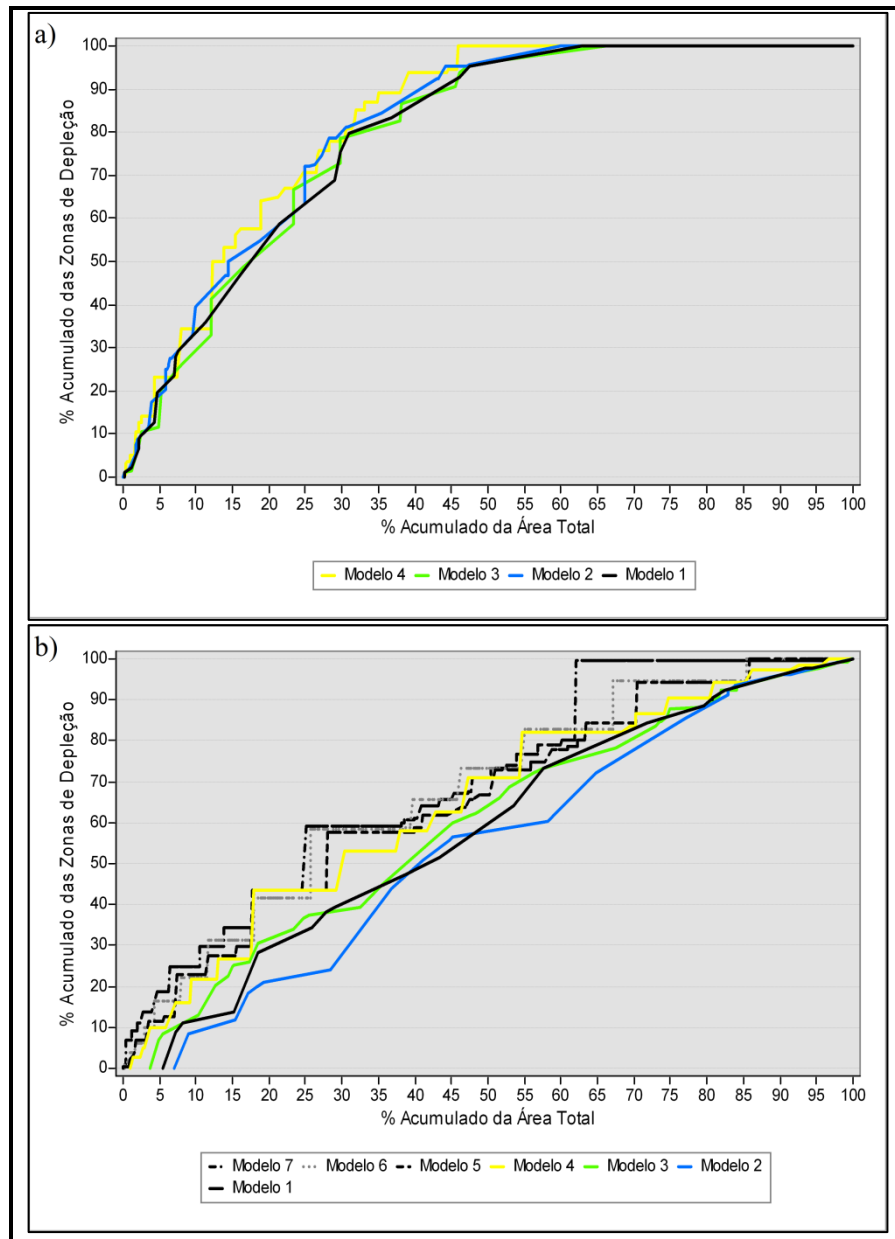
Para o Compartimento 2, apesar de apresentar um maior número de combinações que atendem a condição de independência dos dados, os resultados obtidos com relação à eficiência de classificação (Tabela 4.10 e Figura 4.2b) e quanto à eficiência de predição (Tabela 4.10 e Figura 4.2b) demonstram não haver um razoável ajuste para a maioria dos modelos. Os valores de AUC<sup>1</sup> variaram entre 0,65 a 0,73, enquanto que os valores de AUC<sup>2</sup> variaram entre 0,54 e 0,70. O modelo 7 foi o que apresentou um melhor ajuste entre os demais elaborados para o Compartimento 2, apresentando uma eficiência de classificação da ordem de 0,73 aliado a um poder preditivo de 0,70. Apesar de este modelo apresentar, em relação a outros modelos, uma menor proporção de pontos de treinamento (69%) e da área

das zonas de ruptura (60%) classificados corretamente, demanda menor área para tanto, o que lhe confere maior eficiência.



**Figura 4.2** – Curvas das taxas de sucesso, ilustrando a eficiência de classificação dos modelos de suscetibilidade que atenderam os requisitos de independência condicional no Compartimento 1 (a) e Compartimento 2 (b) no município de Blumenau (SC), Brasil. A análise do desempenho de classificação foi realizada utilizando os 294 pontos de treinamento da análise de favorabilidade. A ordenação dos valores no eixo das abscissas parte das áreas de maior para as de menor valor de probabilidade *a posteriori*.

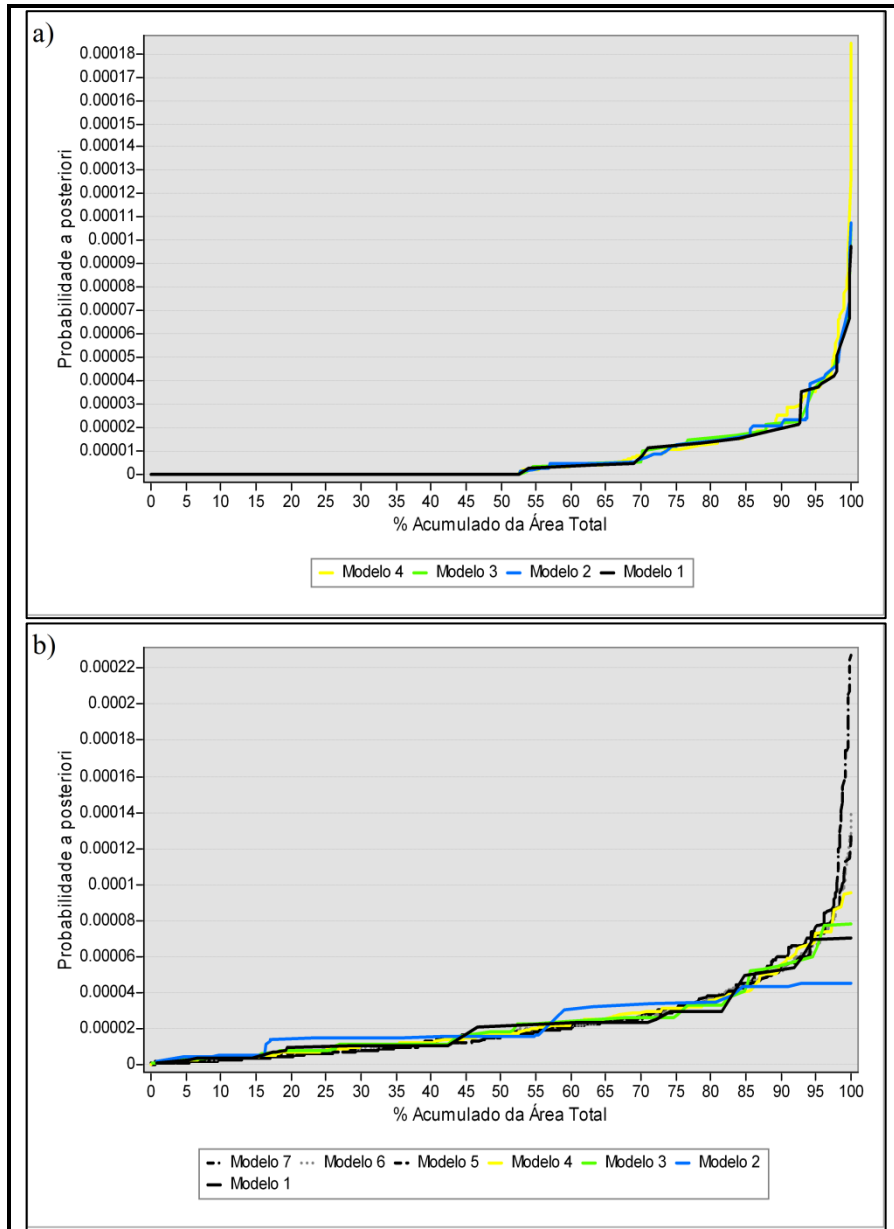




**Figura 4.3** – Curvas das taxas de sucesso, ilustrando a eficiência de predição dos modelos de suscetibilidade que atenderam os requisitos de independência condicional no Compartimento 1 (a) e Compartimento 2 (b) no município de Blumenau (SC), Brasil. A análise do desempenho de predição foi realizada utilizando a área total das zonas de depleção dos deslizamentos utilizados como referência para a análise de favorabilidade, e compreendem um total de 15.630 unidades de área no Compartimento 1 e 14.825 no Compartimento 2. A ordenação dos valores no eixo das abscissas parte das áreas de maior para as de menor valor de probabilidade *a posteriori*.

As Figuras 4.4a e 4.4b ilustram, respectivamente para os Compartimentos 1 e 2, as curvas resultantes da relação entre os valores de probabilidade *a posteriori* e o percentual acumulado da área total. A partir da interpretação destas curvas, foi possível identificar os limites para o estabelecimento das classes de suscetibilidade de cada um dos modelos que atenderam a condição de independência dos dados. O primeiro limite corresponde ao valor da probabilidade *a priori*. Os outros dois valores

utilizados como referência compreendem os pontos que antecedem as inflexões que, segundo avaliação visual, destacam-se na projeção da curva. Desta forma, foram definidas as quatro classes de suscetibilidade para cada compartimento, sendo elas, baixa, média, alta e muito alta.



**Figura 4.4** – Curvas da distribuição dos valores de probabilidade *a posteriori* em relação ao percentual acumulado das áreas relativas ao Compartimento 1 (a) e do Compartimento 2 (b) no município de Blumenau (SC), Brasil. O percentual acumulado encontra-se ordenado das áreas de maior para as de menor valor de probabilidade *a posteriori*.

**Tabela 4.11** – Classes de suscetibilidade a deslizamentos translacionais e respectivos valores da área de abrangência e da proporção dos pontos de treinamento e da área das zonas de depleção, para os quatro modelos de suscetibilidade a deslizamentos translacionais que atenderam os requisitos de independência condicional no Compartimento 1.

Classes de suscetibilidade a deslizamentos	Faixa de valores de probabilidade <i>a posteriori</i>	Número de unidades de área	Área (Km <sup>2</sup> )	% <sup>1</sup>	% <sup>2</sup>	% <sup>3</sup>
<b>Modelo 1</b>						
Baixa	0 - 0,000007	8.247.263	206,2	69,0	9	17
Média	0,000008 - 0,000022	2.799.815	70,0	23,4	47	48
Alta	0,000023 - 0,000044	613.686	15,3	5,1	25	23
Muito Alta	0,000045 - 0,000098	286.923	7,2	2,4	19	13
<b>Modelo 2</b>						
Baixa	0 - 0,000007	8.274.540	206,9	69,3	10	15
Média	0,000008 - 0,000017	1.949.436	48,7	16,3	29	30
Alta	0,000018 - 0,000039	1.030.129	25,8	8,6	24	30
Muito Alta	0,000040 - 0,000107	693.582	17,3	5,8	37	25
<b>Modelo 3</b>						
Baixa	0 - 0,000007	8.367.717	209,2	70,0	11	18
Média	0,000008 - 0,000018	1.622.744	40,6	13,6	24	24
Alta	0,000019 - 0,000046	1.655.882	41,4	13,9	45	47
Muito Alta	0,000047 - 0,000106	301.344	7,5	2,5	20	12
<b>Modelo 4</b>						
Baixa	0 - 0,000007	8.030.197	200,8	67,2	8	15
Média	0,000008 - 0,000011	953.590	23,8	8,0	8	14
Alta	0,000012 - 0,000036	2.363.059	59,1	19,8	51	48
Muito Alta	0,000037 - 0,000184	600.841	15,0	5,0	34	23

%<sup>1</sup> – Proporção em relação ao total da área de estudo; %<sup>2</sup> – Frequência relativa dos 89 pontos de treinamento; %<sup>3</sup> – Proporção da área total das zonas de depleção (15.630 unidades de área).

Através da metodologia adotada e dos modelos selecionados (Tabela 4.11), é possível distinguir situações no Compartimento 1, como no caso do modelo 4, que podem superar em até 26 vezes o valor da probabilidade *a priori* e que, em média, considerando as situações de muito alta suscetibilidade dos quatro modelos, giram em torno de 11% da área. No Compartimento 2 (Tabela 4.12), os valores máximos da probabilidade *a posteriori* superam em até 10 vezes o valor da probabilidade *a priori* (modelo 7) e, em média, as situações de muito alta suscetibilidade ocupam cerca de 12% da área.

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.11, relativo ao modelo 1, que compreende a combinação de fatores com maior independência entre os dados, depreende-se que 31% do Compartimento 1 compreendem situações com algum grau de suscetibilidade, sendo que 23% referem-se a situações de alta a muito alta suscetibilidade. Com relação ao modelo 4, que compreende a combinação de fatores que apresentou a maior eficiência de classificação, aliada a uma maior eficiência de predição, depreende-se que 33% da área do Compartimento 1 compreendem situações com algum grau de suscetibilidade, sendo que, dos quais,

76% referem-se a situações de alta a muito alta suscetibilidade. Entre os quatro modelos selecionados para o Compartimento 1, o modelo 4 é também aquele que apresenta a maior área classificada como suscetível. O modelo 3 é aquele que apresenta a menor área classificada como suscetível, com cerca de 31%.

**Tabela 4.12** – Classes de suscetibilidade a deslizamentos translacionais e respectivos valores da área de abrangência e da proporção dos pontos de treinamento e da área das zonas de depleção, para os sete modelos de suscetibilidade a deslizamentos translacionais que atenderam os requisitos de independência condicional no Compartimento 2.

Classes de suscetibilidade a deslizamentos	Faixa de valores de probabilidade <i>a posteriori</i>	Número de unidades de área	Área (Km <sup>2</sup> )	% <sup>1</sup>	% <sup>2</sup>	% <sup>3</sup>
<b>Modelo 1</b>						
Baixa	0 - 0,000023	4.138.390	103,5	46,6	19	27
Média	0,000024 - 0,000024	2.176.122	54,4	24,5	26	26
Alta	0,000025 - 0,000030	924.815	23,1	10,4	11	13
Muito Alta	0,000031 - 0,000070	1.645.499	41,1	18,5	44	34
<b>Modelo 2</b>						
Baixa	0 - 0,000023	4.912.656	122,8	55,3	30	43
Média	0,000024 - 0,000031	328.969	8,2	3,7	4	1
Alta	0,000032 - 0,000035	1.927.674	48,2	2,7	30	32
Muito Alta	0,000036 - 0,000045	1.715.527	42,9	19,3	35	24
<b>Modelo 3</b>						
Baixa	0 - 0,000023	4.590.555	114,8	51,7	24	37
Média	0,000024 - 0,000028	2.099.656	52,5	23,6	24	25
Alta	0,000029 - 0,000041	839.550	21,0	9,5	12	12
Muito Alta	0,000042 - 0,000078	1.355.065	33,9	15,3	40	26
<b>Modelo 4</b>						
Baixa	0 - 0,000023	5.212.757	130,3	58,7	30	42
Média	0,000024 - 0,000025	355.835	8,9	4,0	5	0
Alta	0,000026 - 0,000050	2.213.180	55,3	24,9	32	36
Muito Alta	0,000051 - 0,000096	1.103.054	27,6	12,4	33	22
<b>Modelo 5</b>						
Baixa	0 - 0,000023	5.333.957	133,3	60,0	30	41
Média	0,000024 - 0,000031	1.137.508	28,4	12,8	15	15
Alta	0,000032 - 0,000056	1.542.847	38,6	17,4	26	21
Muito Alta	0,000057 - 0,000127	870.514	21,8	9,8	29	23
<b>Modelo 6</b>						
Baixa	0 - 0,000023	5.440.783	136,0	61,2	32	41
Média	0,000024 - 0,000032	1.271.941	31,8	14,3	15	17
Alta	0,000033 - 0,000065	1.670.590	41,8	18,8	36	25
Muito Alta	0,000066 - 0,000140	501.512	12,5	5,6	17	16
<b>Modelo 7</b>						
Baixa	0 - 0,000023	5.488.786	137,2	61,8	31	40
Média	0,000024 - 0,000030	1.214.513	30,4	13,7	13	1
Alta	0,000031 - 0,000088	1.942.956	48,6	21,9	38	45
Muito Alta	0,000089 - 0,000227	238.571	6,0	2,7	19	14

%<sup>1</sup> – Proporção em relação ao total da área de estudo; %<sup>2</sup> – Frequência relativa dos 205 pontos de treinamento; %<sup>3</sup> – Proporção da área total das zonas de depleção (14.825 unidades de área).

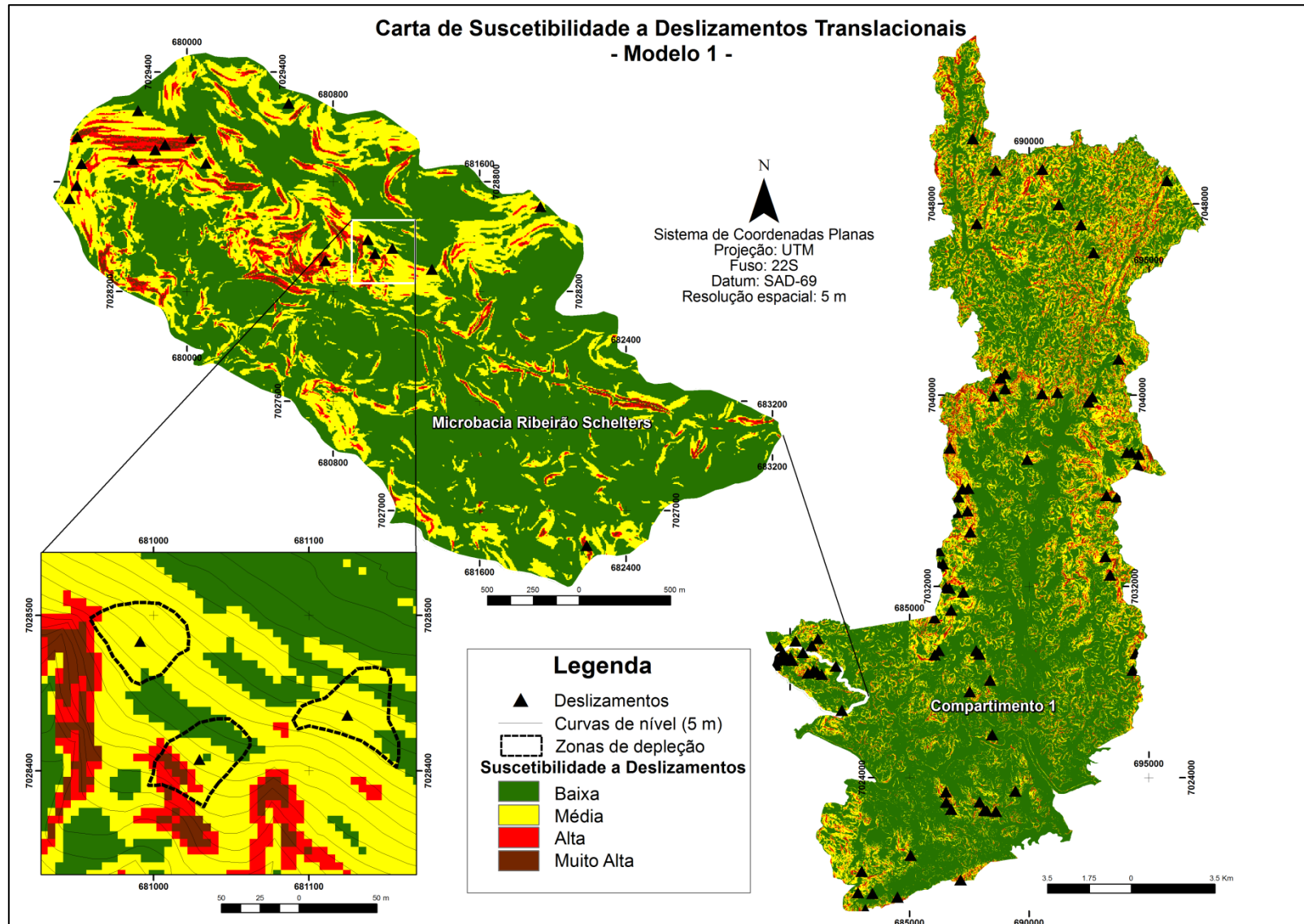
A partir dos dados apresentados na Tabela 4.12 relativos ao modelo 1, que compreende a combinação de fatores com maior independência entre os dados,

depreende-se que 53% do Compartimento 2 compreendem situações com algum grau de suscetibilidade, sendo que 29% referem-se a situações de alta a muito alta. Entre os sete modelos selecionados para o Compartimento 2, o modelo 1 é aquele que apresenta a maior área classificada como suscetível, enquanto que o modelo 7 é o que apresenta a menor área classificada como suscetível. Ainda com relação ao modelo 7, que compreende a combinação de fatores que apresentou maior eficiência de classificação e de predição, depreende-se que 38% da área do Compartimento 2 compreendem situações com algum grau de suscetibilidade, sendo que, dos quais, 64% referem-se a situações de alta a muito alta suscetibilidade.

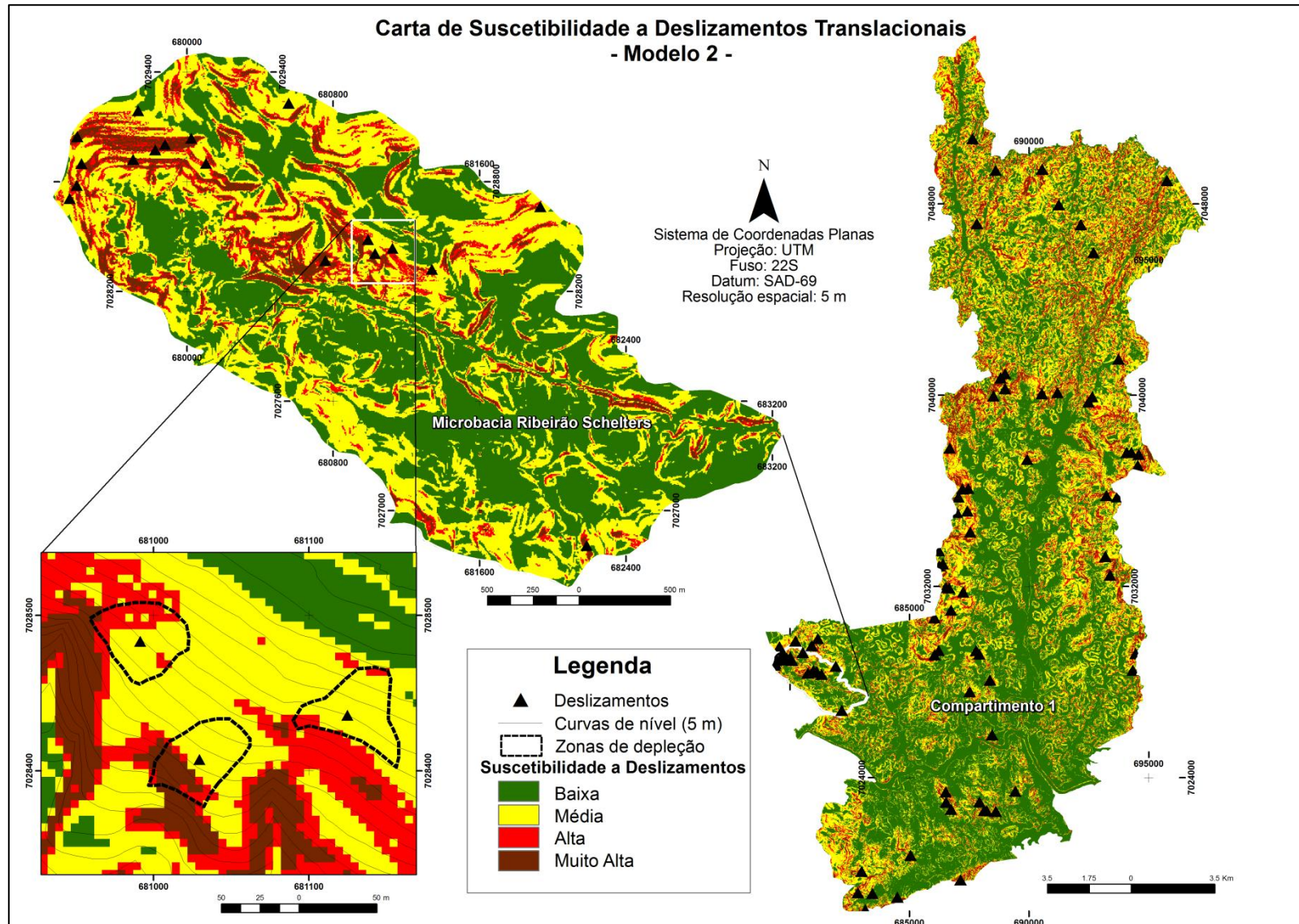
A distribuição espacial da suscetibilidade a deslizamentos de cada um dos modelos selecionados encontra-se representado nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 que correspondem às cartas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais do Compartimento 1 e referem-se, respectivamente, aos modelos 1, 2, 3 e 4. As Figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 correspondem as cartas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais do Compartimento 2 e representam, respectivamente, os modelos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

Conforme sumarizado na Tabela 4.11, no contexto do Cráton Luis Alves (Compartimento 1) as áreas de baixa suscetibilidade correspondem, em média, a 69%. No contexto do Cinturão Dom Feliciano (Compartimento 2), em média 56% da área compreendem sítios de baixa suscetibilidade (Tabela 4.12). Essa diferença é ainda mais acentuada entre os compartimentos considerando apenas as classes alta e muito alta, na medida em que concentram, em média, 16% da área do Compartimento 1 e, proporcionalmente, quase o dobro de área no compartimento 2, com 30% em média.

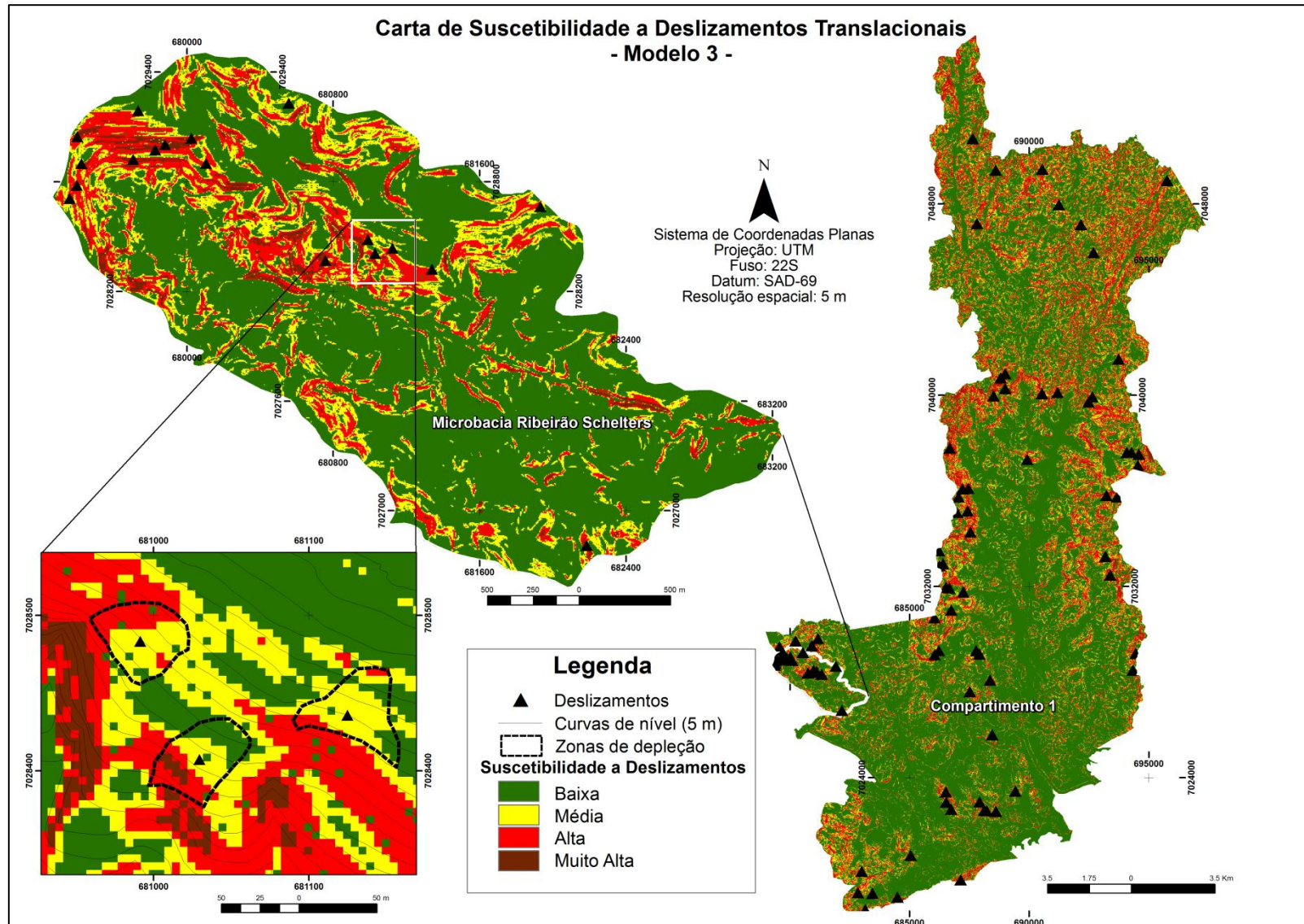
Embora não tenham sido realizados testes para revelar matematicamente o padrão de distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori*, é possível observar diferenças entre as áreas, refletindo as características do modelado de cada compartimento. Conforme ilustra a Figura 4.16, 83% da área ocupada pelo compartimento 1 compreende relevo variando de plano a forte-ondulado. Padrão inverso é observado no compartimento 2, onde 72% do território representa situações de relevo variando de forte-ondulado a escarpado, justificando o padrão disperso das situações de suscetibilidade.



**Figura 4.5** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas curvatura horizontal e declividade.

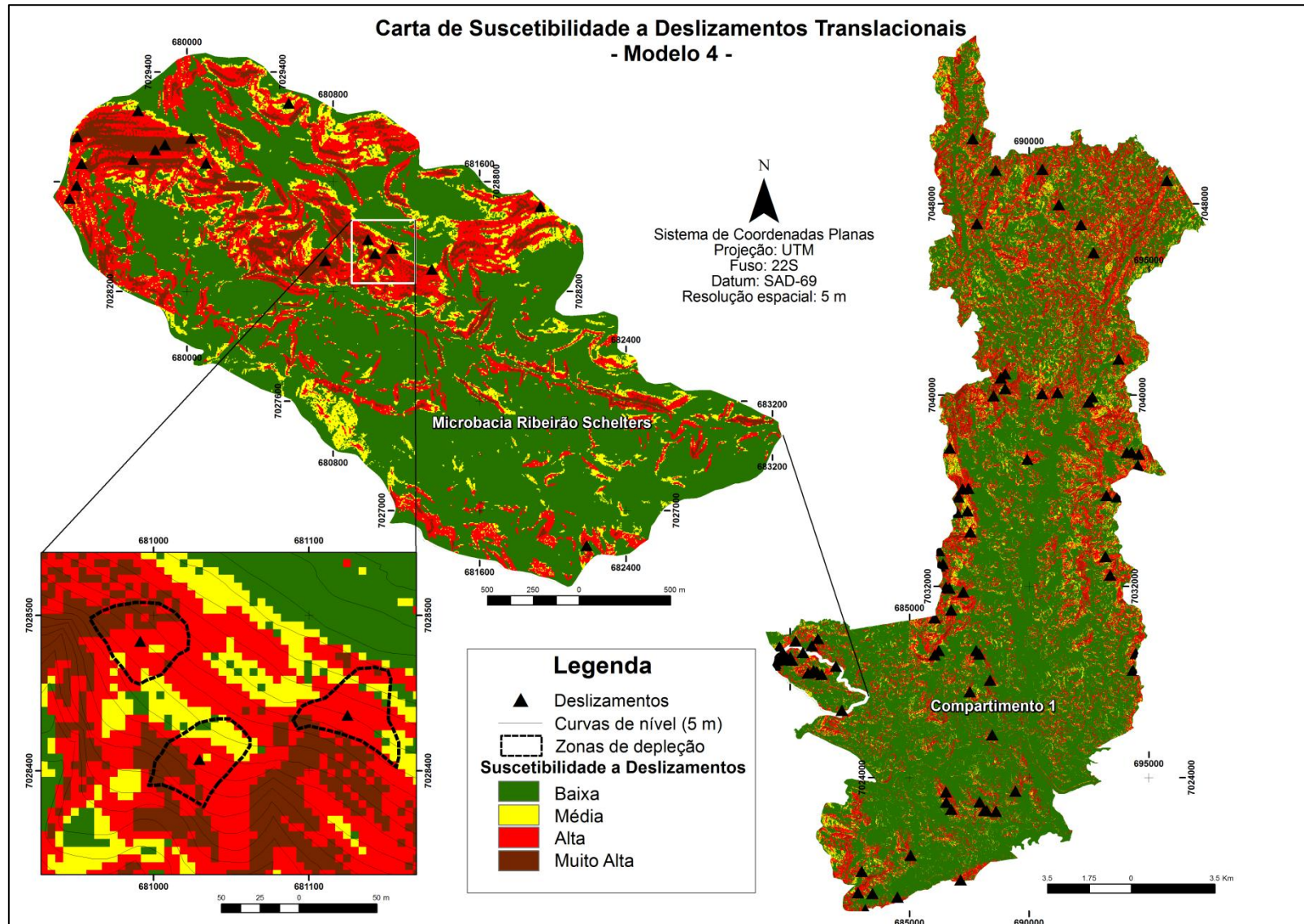


**Figura 4.6** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas distância de lineamentos morfoestruturais, curvatura horizontal e declividade.

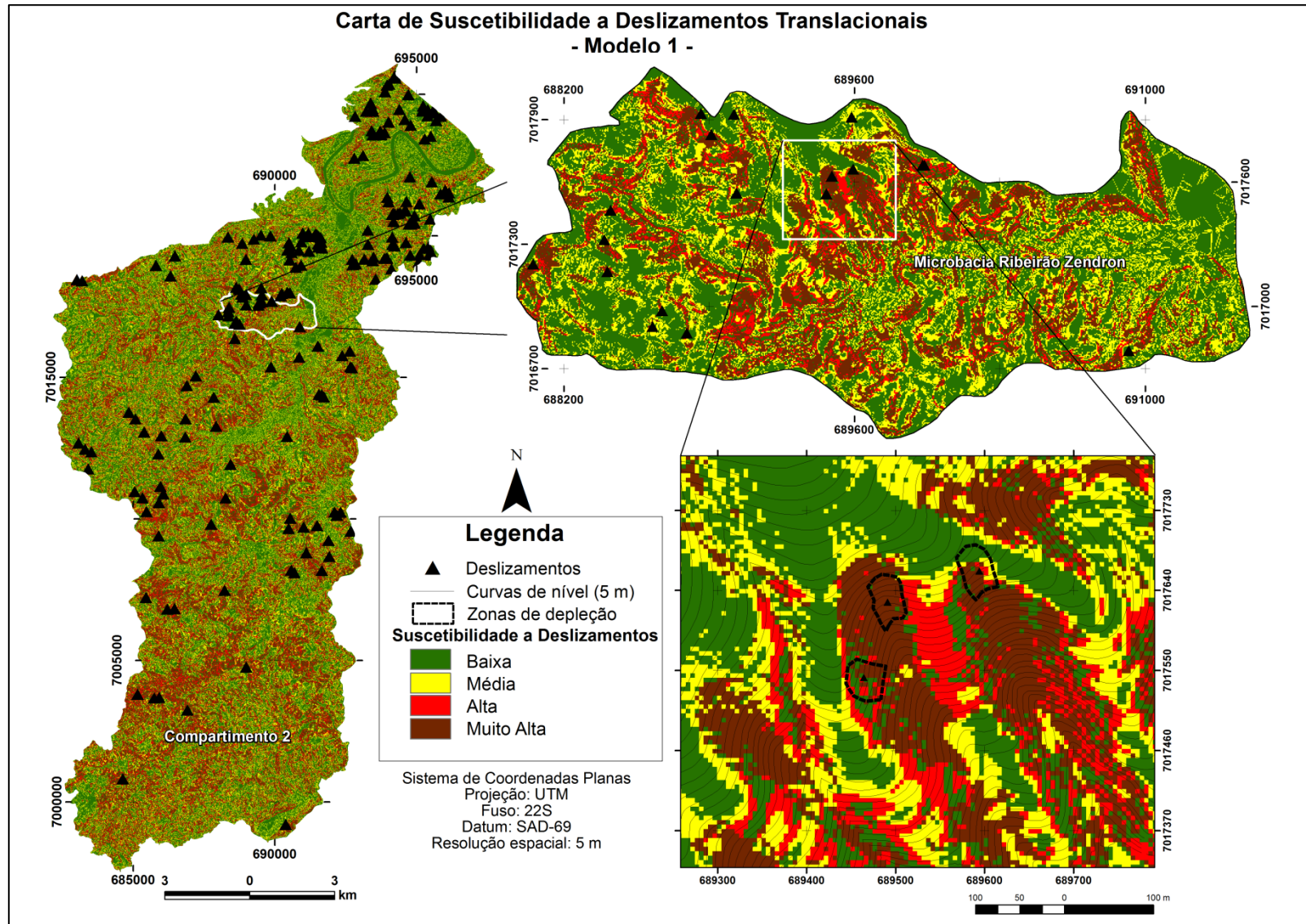


**Figura 4.7** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas curvatura vertical e declividade.

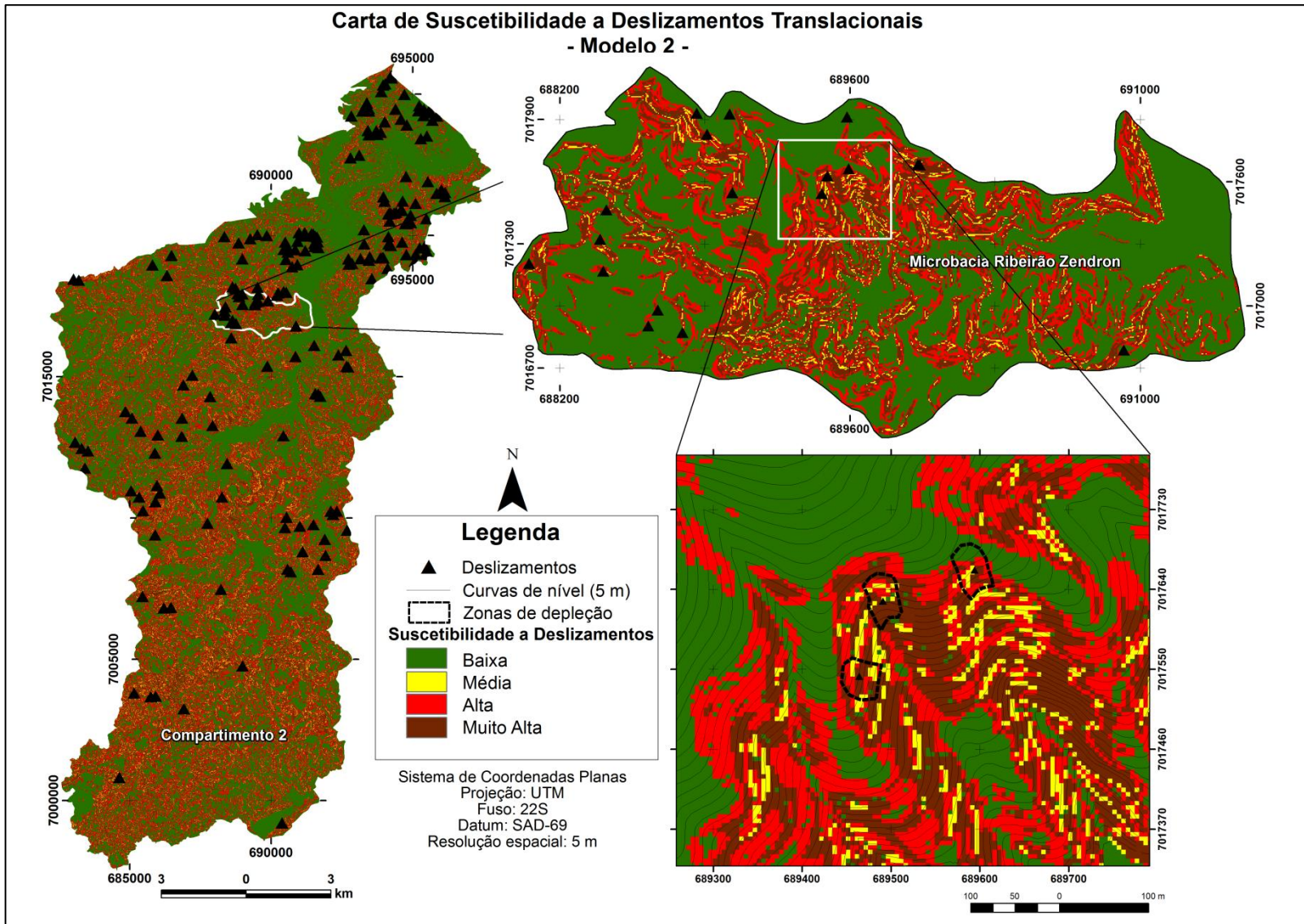




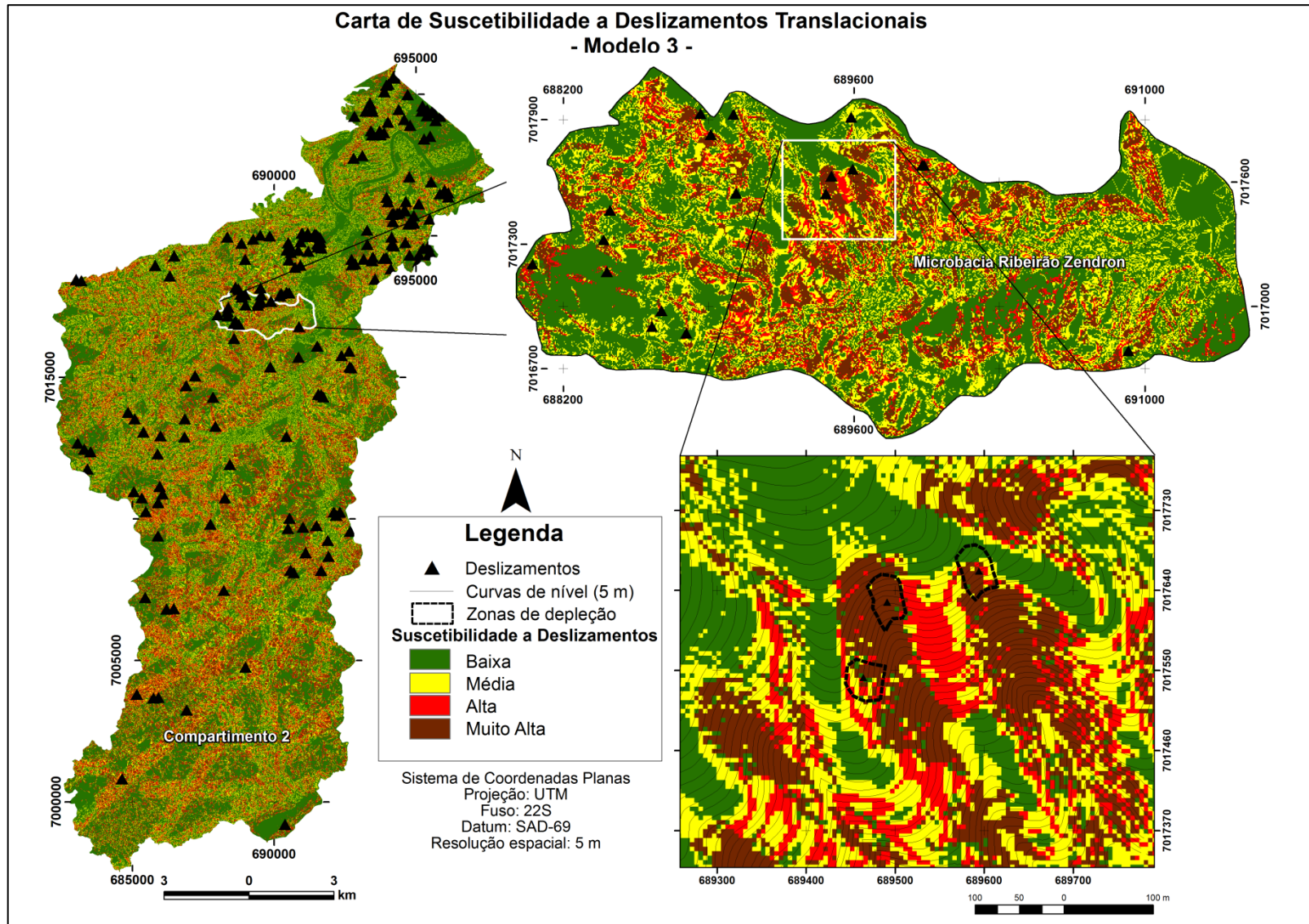
**Figura 4.8** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas distância de lineamentos morfoestruturais, orientação das encostas, curvatura horizontal e declividade.



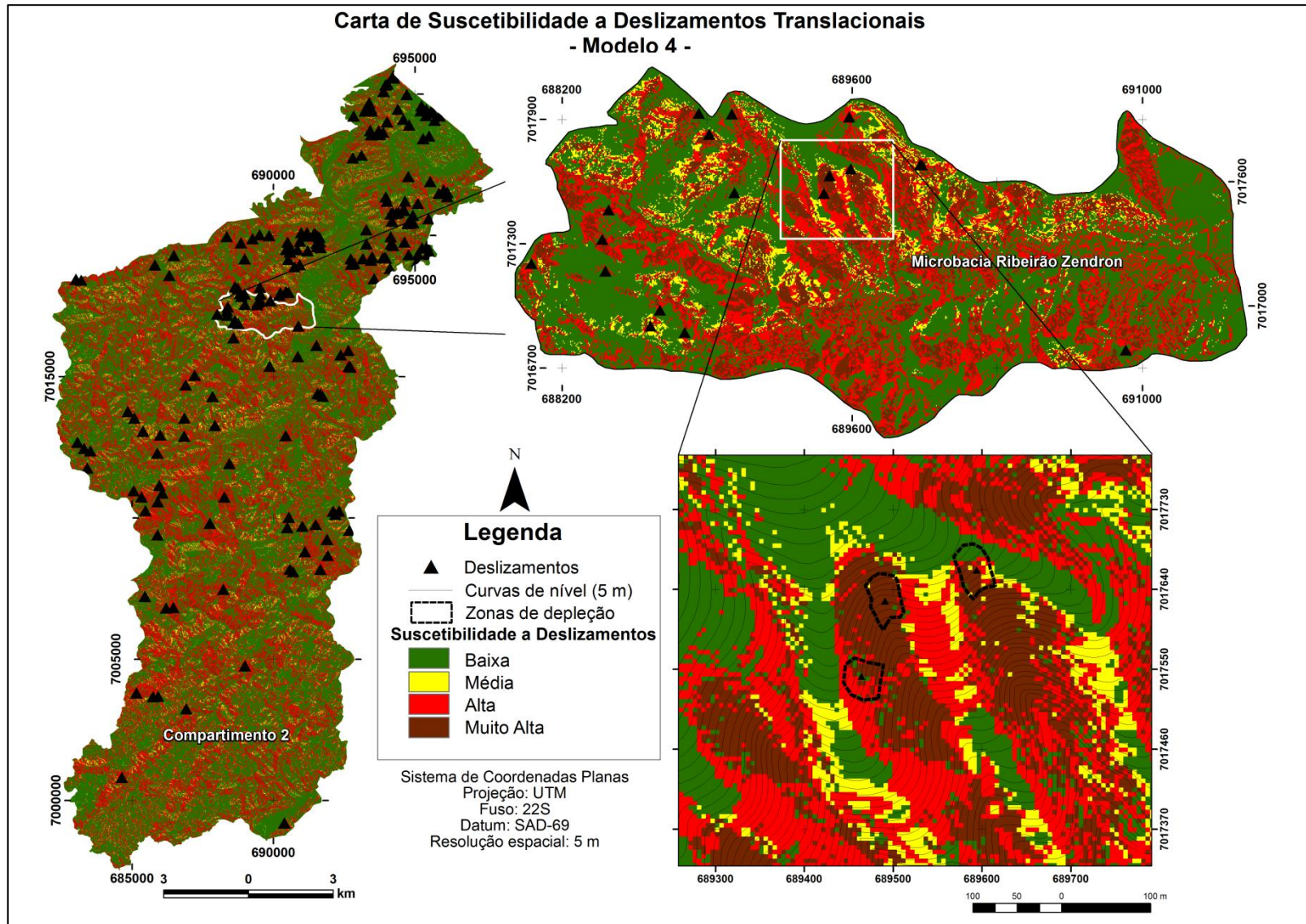
**Figura 4.9** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas curvatura horizontal e declividade.



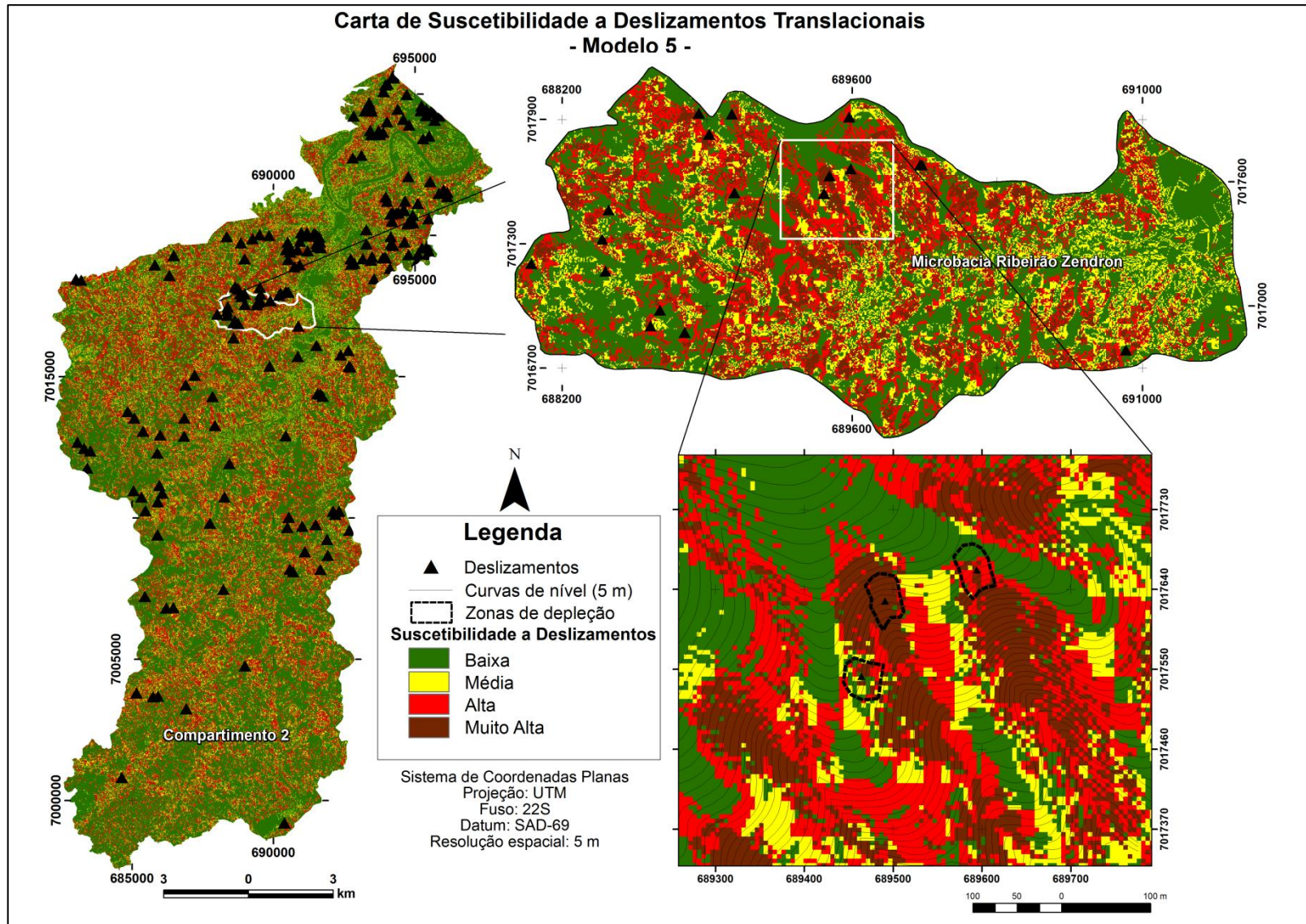
**Figura 4.10** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas curvatura vertical e declividade.



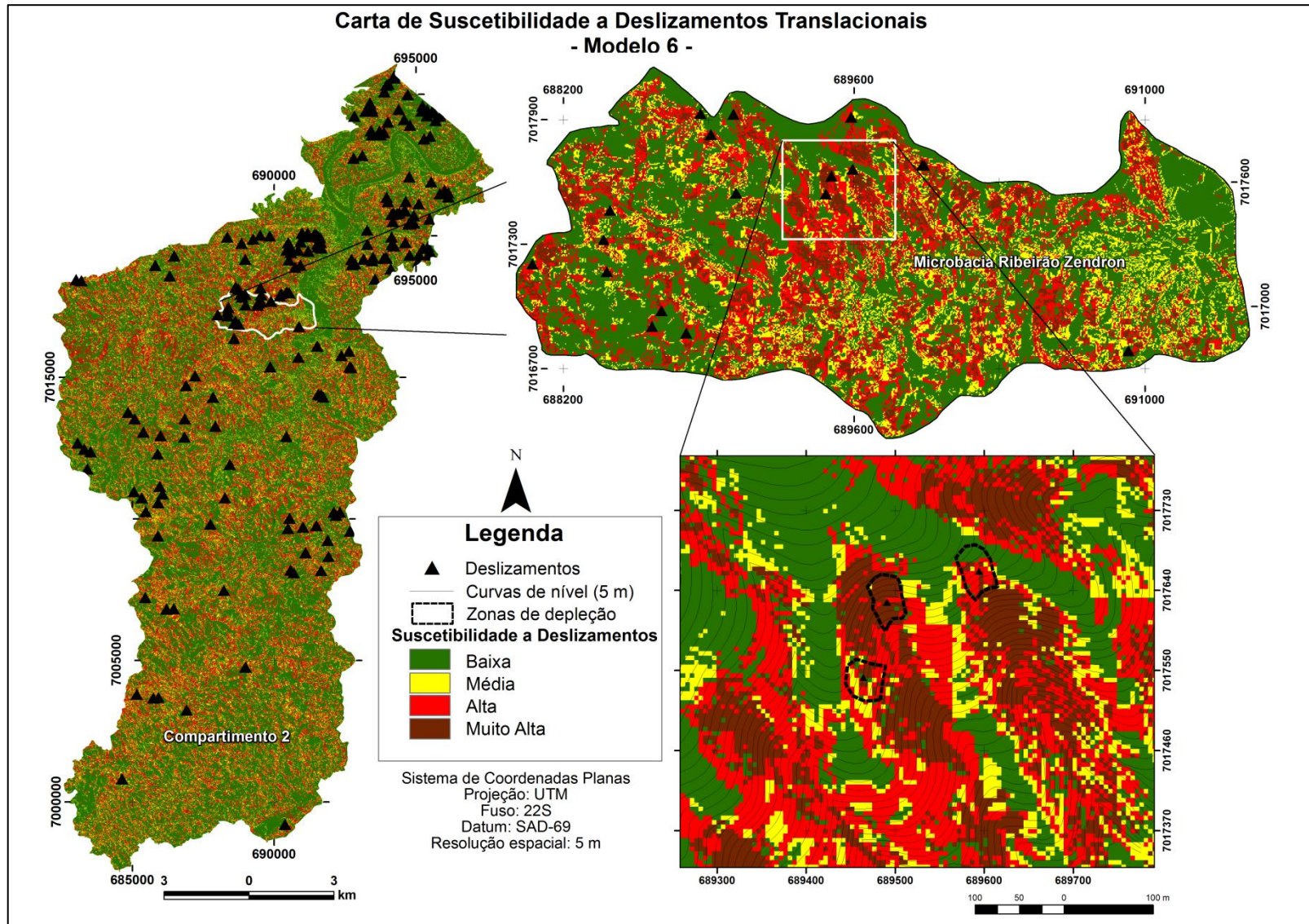
**Figura 4.11** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas distância de lineamentos morfoestruturais, curvatura horizontal e declividade.



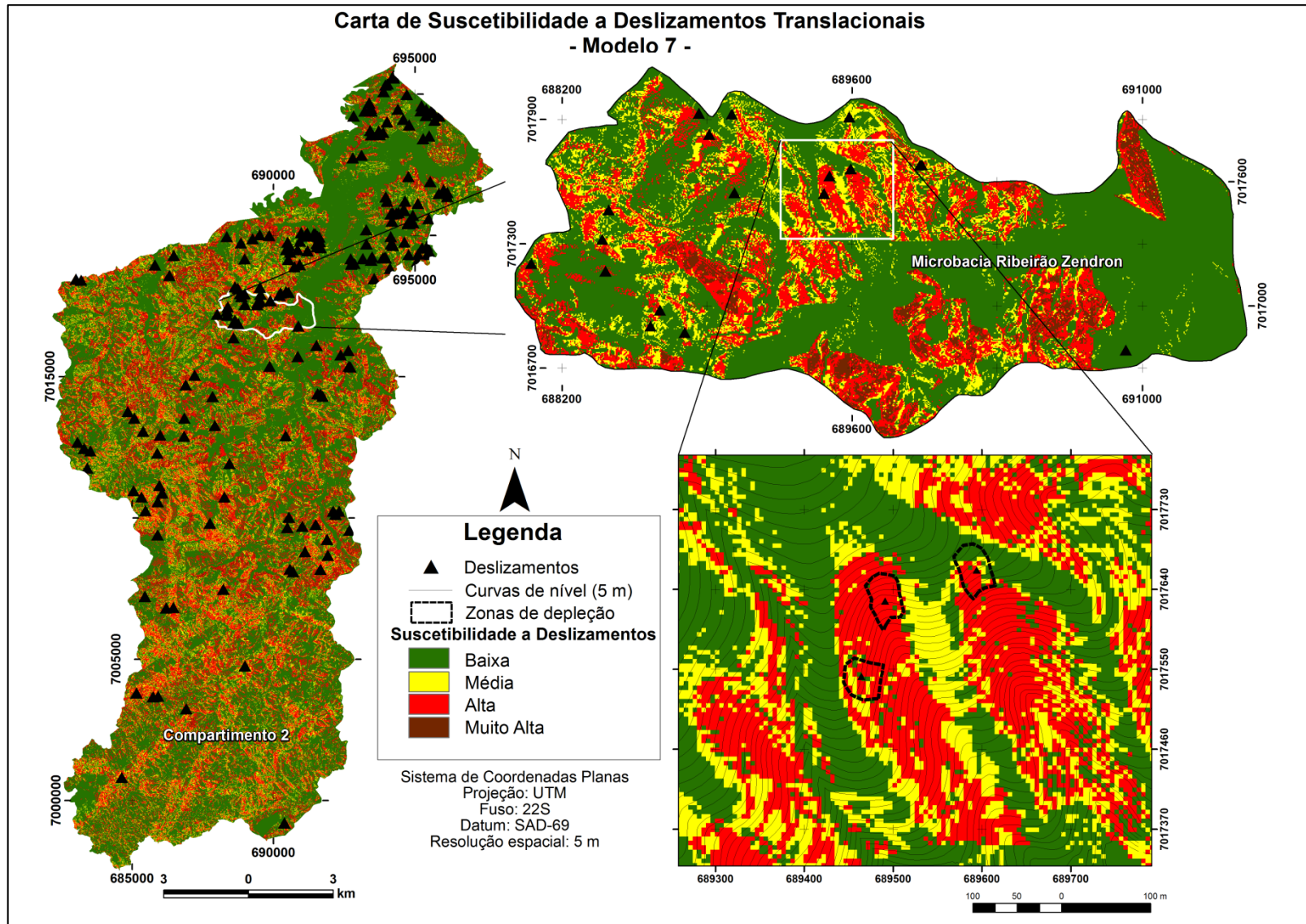
**Figura 4.12** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas distância de lineamentos morfoestruturais, orientação das encostas, curvatura horizontal e declividade.



**Figura 4.13** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas distância de lineamentos morfoestruturais, curvatura horizontal, declividade e NDVI.



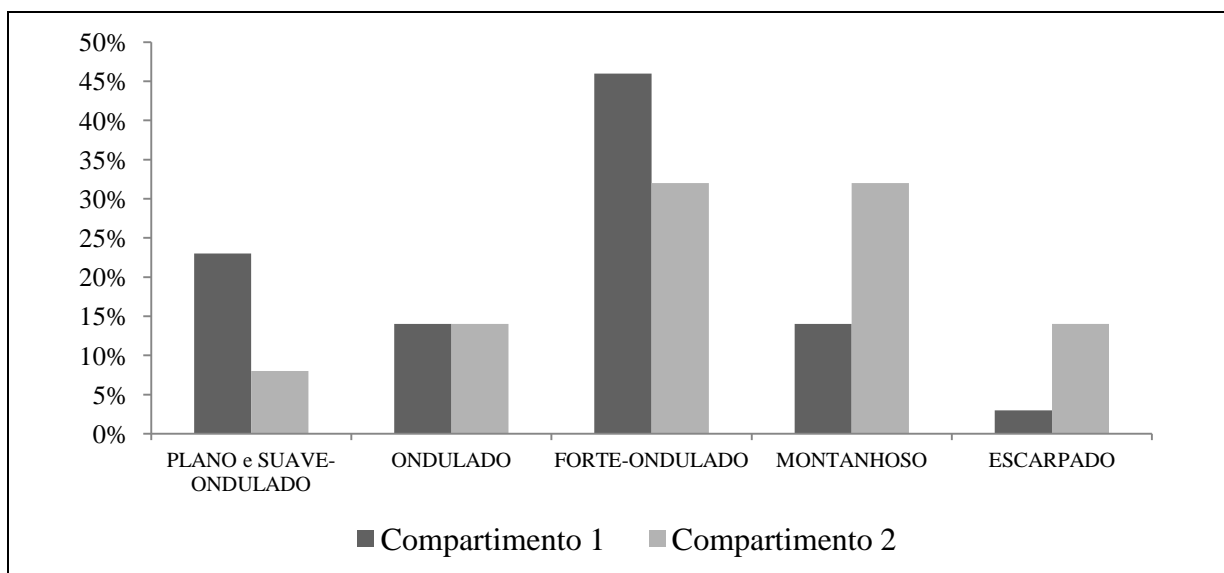
**Figura 4.14** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas orientação das encostas, curvatura horizontal, declividade e NDVI.



**Figura 4.15** – Carta de suscetibilidade a deslizamentos do Compartimento 1, expressando a distribuição espacial dos valores de probabilidade *a posteriori* do modelo que integra os valores ponderados para as classes dos temas distância de lineamentos, orientação das encostas, curvatura horizontal, declividade e uso do solo.



A maior heterogeneidade ambiental, resultante da interação de uma maior diversidade de condições litoestruturais, topográficas e consequentemente pedológicas e vegetacionais, pode ser a responsável pelo maior número de deslizamentos registrados no contexto do Cinturão Dom Feliciano. Por outro lado, pode também influenciar sobre a manifestação diferenciada dos processos de instabilização das encostas neste compartimento, justificando um maior número de combinações que atendem o requisito de independência entre os temas (Tabela 4.9), valores de AUC relativamente menores que os do compartimento 1 (Tabela 4.10) e o considerável número de deslizamentos, 28% em média, situados em locais classificados como de baixa suscetibilidade (Tabela 4.11).



**Figura 4.16** – Distribuição das frequências relativas das fases de relevo nos compartimentos 1 e 2, referindo-se respectivamente aos domínios geotectônicos do Cráton Luis Alves e do Cinturão Dom Feliciano no território do município de Blumenau (SC), Brasil. Classificação adaptada de EMBRAPA (2006).

A discretização dos pontos de treinamento segundo o tipo ou magnitude de atuação dos mecanismos de instabilização poderia contribuir para a avaliação da atuação diferenciada de condicionantes e seus efeitos na composição de modelos preditivos de suscetibilidade, a exemplo de Vergari et al. (2011).

Contudo, conforme sugerido por Huchinson (1988 apud Kozciak 2005), a diversidade de fatores que interferem no processo de movimentos gravitacionais de massa resulta numa variedade de tipos e processos que impossibilitam uma total discretização na classificação.

Diferentes estratégias de representação das zonas de depleção poderiam ser testadas com o intuito de promover melhores ajustes dos modelos, através da atenuação das incertezas associadas ao inventário, discretização e representação das cicatrizes (Ardizzone et al. 2002; Poli & Sterlacchini 2007).

Poli & Sterlacchini (2007) reportam ligeiras diferenças dos resultados entre representações a partir de um ponto centróide ou por um conjunto de pontos (a cada 20 m ou cada 50 m), que incorreram em diferenças não significativas na distribuição dos valores de suscetibilidade, como função da adoção de diferentes estratégias. Os autores mencionam ainda que, se por um lado, a adoção de um conjunto de pontos compreende uma abordagem mais conservadora, por outro, um maior número de pontos pode promover maior redundância.

Outra estratégia não menos importante, refere-se à possibilidade de incorporação de dados relativos aos atributos dos solos e que influenciam diretamente na suscetibilidade a deslizamentos, tal qual a profundidade, textura, estrutura, permeabilidade, densidade e resistência ao cisalhamento. Neuhäuser & Terhorst (2007), Poli & Sterlacchini (2007), Dahal et al. (2008), Quinn et al. (2010), Regmi et al. (2010), Ozdemir (2011) e Prasannakumar & Vijith (2012) são exemplos de trabalhos que utilizaram atributos dos solos para a análise de favorabilidade e composição de modelos preditivos.

De qualquer forma e, segundo as condições modeladas no presente trabalho, resta provado para o Compartimento 1 que a combinação entre os valores ponderados das classes dos temas distância de lineamentos, orientação das vertentes, curvatura horizontal e declividade são suficientes para responder por 92% dos pontos de treinamento e por 85% da área total das zonas de depleção dos deslizamentos utilizados como referência. Para o Compartimento 2, a combinação entre os valores ponderados das classes dos temas distância de lineamentos, orientação das vertentes, curvatura horizontal, declividade e uso do solo foi a que apresentou o melhor ajuste (Tabela 4.10).

A ausência de discrepâncias entre os resultados de favorabilidade reportados no capítulo 3 em relação aos resultados ora apresentados (Tabelas 4.1 a 4.6), e o fato de que em ambos os compartimentos as combinações que consideram os temas declividade, curvatura horizontal ou curvatura vertical e distância de lineamentos atenderam aos pressupostos de independência (Tabela 4.9), apesar de

uma menor eficiência de classificação e de predição no caso do Compartimento 2 (Tabela 4.10), constituem elementos que corroboram com a aplicação dos modelos de suscetibilidade propostos considerando todo o território, muito embora a escala de valores da probabilidade *a posteriori* possa variar quando calculada para os compartimentos isoladamente.

Por outro lado, através da análise segregada mediante a compartimentação geomorfológica da área de estudo, foi possível identificar que, quando somadas as áreas de elevada suscetibilidade dos modelos que apresentaram os melhores ajustes de classificação de ambos os compartimentos (modelo 4 do Compartimento 1 e modelo 7 do Compartimento 2) (Tabela 4.10), obtém-se uma projeção de que cerca de 25% do território de Blumenau (SC) compreendem situações de alta a muito alta suscetibilidade a deslizamentos translacionais (Tabelas 4.11 e 4.12), contra os 15% reportados através da análise considerando todo o município. Considerando os resultados obtidos através dos modelos que apresentaram maior área classificada como de elevada suscetibilidade, ou seja, do modelo 4 do Compartimento 1 e do modelo 2 do Compartimento 2, obtém-se uma projeção da ordem de 32%, contra os 28% do modelo 3, conforme reportado no capítulo 3.

#### 4.4. CONCLUSÕES

O mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos translacionais no município de Blumenau (SC) foi conduzido através da abordagem bayesiana, mediante a aplicação da técnica pesos de evidência. Considerando a identificação de dois domínios geotectônicos distintos no território do município, a rotina de análise foi conduzida separadamente para cada compartimento, no intuito de identificar se diferenças de natureza litoestruturais poderiam influenciar nas respostas de favorabilidade dos fatores condicionantes e no ajuste dos modelos preditivos gerados.

Os resultados demonstraram respostas de favorabilidade ligeiramente diferentes entre os compartimentos para os fatores declividade, distância de lineamentos e orientação das vertentes. Os fatores curvatura horizontal e curvatura vertical não apresentaram diferenças nas respostas de favorabilidade entre as áreas.

Razões de natureza prática limitam a representação, mesmo que aproximada e em escala razoável, da variabilidade espacial de todos os atributos do meio físico e dos demais elementos relacionados ao uso e cobertura do solo que importam para a análise da estabilidade das vertentes. Contudo, a partir dos resultados obtidos, é possível depreender a divergência em relação ao conceito de que as formações florestais nativas representariam um importante indicador de estabilidade das encostas e, portanto, úteis para a formulação de modelos preditivos de suscetibilidade a deslizamentos. Sugerem, no entanto, que as evidências relacionadas ao padrão de cobertura do solo devam ser utilizadas com cuidado, no sentido de evitar a formulação equivocada de modelos preditivos, especialmente quando seu papel na estabilidade de encostas é interpretado de maneira equivocada.

A presença da vegetação florestal não demonstrou suficiência para suplantar os efeitos dos demais fatores que atuam diretamente sobre a instabilidade das encostas, especialmente àqueles decorrentes da declividade e da convergência dos fluxos hídricos, sugerindo que os processos ora analisados, ou pelo menos a maior parte deles, e independente do contexto geomorfológico, referem-se à evolução natural das vertentes da área de estudo. Dessa forma, torna-se razoável admitir que, independente do papel exercido pela vegetação, os deslizamentos ocorrem graças à

influência preponderante de outros fatores que atuam no controle da estabilidade das encostas naturais, como função do processo de evolução natural das vertentes, e a remoção da cobertura vegetal, aliada a toda sorte de modificações artificialmente promovidas no ambiente natural, induzem a formação de áreas suscetíveis ou potencializam as situações naturais existentes.

No domínio das rochas do Cráton Luis Alves, quatro modelos de suscetibilidade atenderam os pressupostos de independência espacial, concorrendo com sutis diferenças quanto à eficiência de classificação e de predição. Contudo, o modelo que integra os valores das classes dos fatores distância de lineamentos morfoestruturais, orientação das vertentes, curvatura horizontal e declividade, compreende àquele que apresentou o melhor ajuste final.

No compartimento representado pelas rochas do Cinturão Dom Feliciano, sete modelos atenderam a condição de independência espacial, apresentando relativa variação no que se refere à eficiência de classificação e de predição. A combinação que integra os dados dos fatores distância de lineamentos morfoestruturais, orientação das vertentes, curvatura horizontal, declividade e uso do solo representa o modelo de melhor ajuste final.

A maior área suscetível identificada através da compartimentação geomorfológica confere um caráter mais conservador aos modelos obtidos através da análise segregada, contribuindo para uma maior segurança no processo de avaliação dos riscos associados a deslizamentos e ordenamento territorial no município.

A maior área classificada como suscetível no domínio do Cinturão Dom Feliciano, tanto em valores relativos quanto absolutos, aliado ao padrão disperso de distribuição dos sítios suscetíveis, constitui argumento indelével na proposição de que esta unidade do território apresenta sérias limitações frente o processo de crescimento e expansão urbana e ao aproveitamento do solo.

Por outro lado, mesmo que a porção compreendida pelo domínio do Cráton Luis Alves apresente maior área de relativa estabilidade, e isto incorra naturalmente no estímulo ao crescimento urbano, os resultados também revelam a existência de considerável área suscetível, suscitando a adoção de medidas destinadas a identificar e mitigar as situações de risco existentes e evitar, ou pelo menos controlar, a formação de novas situações.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manifestação de movimentos gravitacionais de massa pressupõe a ação combinada de fatores condicionantes. O peso da atuação de cada fator pode ser representado quantitativamente através da análise de favorabilidade, segundo as premissas da abordagem bayesiana.

Através da integração dos valores ponderados, controlada espacialmente pela presença ou ausência da classe favorável de cada fator, é possível compor modelos objetivos de suscetibilidade, expressa através da probabilidade *a posteriori*. Com o intuito de evitar redundâncias na composição dos modelos, análises estatísticas auxiliam na identificação das relações de dependência espacial entre os temas. Finalmente e, segundo um modelo de evento, é possível testar a eficiência de classificação das composições geradas, e identificar àquela que melhor representa a suscetibilidade da área de estudo.

No presente trabalho foram analisadas as relações espaciais entre 294 deslizamentos translacionais e os temas unidades geológicas, distância de lineamentos, orientação das vertentes, curvatura horizontal, curvatura vertical, declividade, uso do solo e NDVI.

Através da análise considerando todo o território do município de Blumenau, foi possível identificar que o modelo que integra os pesos dos temas distância de lineamentos, curvatura horizontal e declividade é o que melhor atende os requisitos de independência espacial, conjugado com uma eficiência de classificação da ordem de 80%, aliada a uma eficiência de predição da ordem de 69%. A partir deste modelo, é possível reconhecer que 15% do município correspondem a áreas classificadas como sendo de alta a muito alta suscetibilidade a deslizamentos translacionais.

Através da análise segregada, considerando os compartimentos geomorfológicos isoladamente, foi possível identificar para o Compartimento 1, que a combinação dos pesos dos temas distância de lineamentos, orientação das vertentes, curvatura horizontal e declividade apresentou os melhores ajustes. Este modelo apresentou uma eficiência de classificação da ordem de 87%, e de predição da ordem de 83%, permitindo reconhecer que cerca de 25% da área deste compartimento compreendem situações de alta a muito alta suscetibilidade. No caso

do Compartimento 2, a combinação dos temas distância de lineamentos, orientação das vertentes, curvatura horizontal, declividade e uso do solo resultou em uma eficiência de classificação da ordem de 73%, aliada a uma eficiência de predição de 70%. Este modelo permite identificar que, cerca de 25% da área do Compartimento 2 compreende situações de elevada suscetibilidade.

Desta forma, somando as áreas classificadas de ambos os compartimentos, é possível reconhecer que 25% (aproximadamente 129 Km<sup>2</sup>) do município compreendem situações de alta a muito alta suscetibilidade a deslizamentos translacionais.

Embora os modelos tenham apresentado razoáveis indicadores de eficiência de classificação e de predição, conforme o modelo de evento utilizado, os mesmos devem ainda ser objetos de análise de validação externa, preferencialmente após a ocorrência de novos eventos deflagrados naturalmente.

Considerando a aplicação das cartas de suscetibilidade como elemento norteador da gestão do risco e do ordenamento territorial no município de Blumenau, convém salientar que os modelos propostos representam apenas a suscetibilidade de ruptura, tornando indispensável derivar a interpretação com vistas à completa definição da ameaça que representam, tanto no espaço, quanto no tempo, sobretudo sobre as porções classificadas como de média ou baixa suscetibilidade, mas ainda sujeitas aos efeitos decorrentes da mobilização e dejeção do material transportado a partir da deflagração de deslizamentos.

A interpretação das ameaças locais se reveste de importância ainda maior na medida em que, embora a técnica pesos de evidência permita a identificação objetiva dos locais de maior predisposição à ocorrência do fenômeno, e os modelos de suscetibilidade apresentados possam ser úteis como suporte para as demais etapas da gestão do risco associado a deslizamentos, sua aplicação requer o necessário reconhecimento de que, como qualquer outra representação de fenômenos complexos, é inerentemente incerta.

As fontes de incertezas referem-se desde a concepção do fenômeno quanto a sua representação e análise. Quanto mais aprimorada for a caracterização dos deslizamentos, especialmente com relação à variabilidade e magnitude de atuação dos mecanismos de instabilização e, quanto maior o número de atributos suficientemente detalhados, mais acurada será a concepção e representação dos

fenômenos analisados e conseqüentemente o poder de predição dos modelos de suscetibilidade propostos.

Conforme frisado por diferentes autores, os movimentos de massa podem ocorrer em pontos específicos das vertentes, influenciados por detalhes locais como, por exemplo, uma maior espessura de solo ou maior altura da zona saturada, ou ainda outras questões fortuitas que também não foram consideradas no presente trabalho.

Desta forma, é possível destacar para a área de estudo a existência de lacunas de conhecimento, e que se relacionam em diferentes aspectos vinculados à gestão do risco de deslizamentos e processos correlatos, dentre as quais, três são destacadas no momento.

A primeira diz respeito à carência de informações, em escala apropriada, que traduzam aspectos litológicos e estruturais da área de estudo. A segunda refere-se à carência de informações, também em escala apropriada, da distribuição dos diferentes tipos de materiais inconsolidados, bem como dos parâmetros mecânicos e físico-hídricos dos solos (espessura, pesos específicos, ângulo de atrito interno, coesão, condutividade hidráulica, porosidade, distribuição granulométrica, entre outros). Estas informações poderão contribuir para uma melhor caracterização e entendimento sobre os processos e mecanismos de instabilização, análises de suscetibilidade, desenvolvimento de sistemas de previsão de deslizamentos, bem como para demais aplicações e análises ambientais da área de estudo.

A terceira lacuna, não menos importante, refere-se à necessidade de desenvolvimento de análises destinadas à representação objetiva da distribuição espacial das situações de risco associadas a deslizamentos e processos correlatos, implicando no desenvolvimento de pesquisas focadas na análise da distribuição espacial e dimensionamento das ameaças bem como da vulnerabilidade dos elementos a elas expostos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNEE, A. C.; THOMPSON, J. A.; KOLKA, R. K.; D'ANGELO, E. M.; COYNE, M. S. 2004. Landscapes influences on potential soil respiration rates in a forested watershed southeastern Kentucky. **Environmental Management**. 33(1): 160-167.
- AEROIMAGEM S/A. 2003. **Levantamento aerofotogramétrico do município de Blumenau, Santa Catarina, Brasil**. Escala 1:30.000.
- AGTERBERG, F. P. & CHENG, Q. 2002. Conditional independence test for Weights-of-Evidence modelling. **Natural Resources Research**, v. 11(4):249 – 255.
- AGTERBERG, F. P.; BONHAM-CARTER, G. F. & WRIGHT, D. F. 1990. Statistical pattern integration for mineral exploration. In: GAAL, G. & MERRIAM, D. F. (Eds). **Computer applications in resource estimation prediction and assessment for metals and petroleum**. Oxford: Pergamon.
- AGTERBERG, F.P. 1989. Computer programs for mineral exploration. **Science**, 245: 76-81.
- AHRENDT, A. Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão (SP). **Tese** (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos. São Paulo. 334 p.
- ARAÚJO, P. C. DE, 2004. Análise da suscetibilidade a escorregamentos: uma abordagem probabilística. **Tese** (Doutorado). Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, São Paulo. 2004. 172pp.
- ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; CARRARA, A.; GUAZZETTI, F.; REICHENBACH, P. 2002. Impact of mapping errors on the reliability of landslides hazard maps: **Nat. Hazards Earth System Sci.**, 2: 3–14.
- ARMAS, I. 2012. Weights of evidence method for landslide susceptibility mapping: Prahova Subcarpathians, Romania. **Nat Hazards**, 60:937–950.
- AUGUSTO-FILHO, O.; VIRGILI, J. C. 1998. Estabilidade de taludes. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE. p. 243-270.
- AUMOND, J. J.; SEVEGNANI, L. 2009. Descrição do desastre: os escorregamentos de encostas. In: Frank, B.; Sevegnani, L. (Eds.). **Desastre de 2008: água, gente e política**. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí. p. 78-91.
- AWDZIEJ, J.; PORCHER, C. A.; SILVA, L. C. da. 1986. **Mapa geológico 1:500.000 de Santa Catarina**. Brasília: CPRM.
- BASEI, M. A. S. 1985. O Cinturão Dom Feliciano em Santa Catarina. **Tese (Doutorado)**. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 191 p.
- BASEI, M. A. S.; DRUKAS, C. O.; NUTMAN, A. P.; WEMMER, K.; DUNYI, L.; SANTOS, P. R.; PASSARELLI, C. R.; CAMPOS NETO, M. C.; SIGA, O. Jr.; OSAKO, L. 2011. The Itajaí foreland basin: a tectono-sedimentary record of the Ediacaran period, Southern Brazil. **International Journal of Earth Sciences**, 100(2-3): 543-569.

BAUM, R. L.; GODT, J. W. 2010. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in USA. **Landslides**. 7: 259-272.

BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E.; HERMANN, M. L. de P.; SANTOS, G. F. dos; MENDONÇA, M.; SALAMUNI, R.; SUGUIO, K. 2003. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e sub-tropicais**. Vol. 3., 2 ed. Florianópolis: UFSC.

BLUMENAU. DIRETORIA MUNICIPAL DE GEOLOGIA, ANÁLISE E RISCOS NATURAIS. 2012b. Banco de dados geoambientais: inventário de movimentos gravitacionais de massa. **Não publicado**.

BLUMENAU. SECRETARIA MUNICIPAL DE DEFESA CIVIL. 2008. Plano Municipal de Redução de Riscos de Blumenau. **Relatório Final**. Blumenau: FURB/SEDEF. Disponível em <http://www.blumenau.sc.gov.br>

BLUMENAU. SECRETARIA MUNICIPAL DE DEFESA CIVIL. 2012a. Banco de dados da Defesa Civil. **Não publicado**.

BOLENEUS, D. E.; RAINES, G. L., CAUSEY, J.D., BOOKSTROM, A. A., FROST, T. P., HYNDMAN, P. C. 2001. **Assessment method for epithermal gold deposits in northeast Washington State using weights-of-evidence GIS modeling**. Open-File Report 01-501. USGS. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-501/>. Acessado em: 09 de set 2012.

BONHAM-CARTER, G.F. 1994. **Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS**. Ottawa: Pergamon. 398p.

BONHAM-CARTER, G.F.; AGTERBERG, F. P., WRIGHT, D. F. 1989. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. In: Agterberg, F. P.; Bonham-Carter, G. F. (Eds.). **Statistical Applications in the Earth Sciences**. Ottawa: Geological Survey of Canada, p. 171-183.

CALDASSO, A. L., KREBS, A. S. J., SILVA, M. A. S.; CAMOZZATO, E., RAMGRAB, G. E. 1995. **Mapa geológico 1:50.000 da folha Brusque, SC, SG-22-Z-D-II-1)**. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Brasília:CPRM. 243p.

CAMMERAAT, E.; BEEK, R. van; KOOIJMAN, A. 2007. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain. In: STOKES, A.; SPANOS, I.; NORRIS, J. E.; CAMMERAAT, E. (Eds). **Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability**. Dordrecht: Springer. p. 21–30.

CASTRO, N. A. de; CRÓSTA, A. P.; FERREIRA, F. J. F.; BASEI, M. A. S.; PASCHOLATI, M. E. Quadro geológico regional da porção central do embasamento pré-ordoviciano de Santa Catarina com base em imagens Landsat-5/TM e aerogeofísicas. **Revista Brasileira de Geociências**, 33(2): 161-172. 2003.

CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. 1971. **Physical geography: a system approach**. Londreas: Prentice Hall. 351p.

CHORLEY, R.J., SCHUMM, S.A., SUDGEN, D.E. 1984. **Geomorphology**. Londres: Methuen. 605 p.

CHRISTOFOLETTI, A. 1974. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher. 149 p.

CHUNG, C. F., FABRI, A. G. 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. **Natural Hazards**, 30: 451-472.

- CLARK, M.; SMALL, J., 1982. **Slopes and weathering**. Cambridge: Cambridge University Press. 1982. 112 p.
- COELHO, F. F. 2010. Comparação de métodos de mapeamento digital de solos através de variações geomorfométricas e sistemas de informações geográficas. **Dissertação (Mestrado)**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 80p.
- CORREIA, M. R. D.; NOGUEIRA, R. E.; SOUZA FILHO, C. R.; POZZOBON, M. 2013. Aplicação da técnica Pesos de Evidência (Weights of Evidence - WofE) para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos na região do baixo vale do Itajaí-SC. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013. Anais... Foz do Iguaçu: INPE. p. 6010-6017.
- CRUDEN, D. M. & VARNES, D. J. 1996. Landslides types and processes. In: TURNER, A. K. & SCHUSTER, R. L. (Eds.). **Landslides: investigation and mitigation**. Special Report 247/Transportation Research Board. Washington: National Academy Press.
- DAHAL, R. K.; HASEGAWA, S.; NONOMURA, A.; YAMANAKA, M.; MASUDA, T.; NISHINO, K. 2008. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. **Environ. Geol.**, 54:311–324.
- DIKAU, R. 2004. Mass Movement. In: Goudie, A. (Org.). **Encyclopedia of Geomorphology**. Londres: Routledge. p. 644-652.
- DUPUY, L.; FOURCOUD, T.; SOTKES, A. 2007. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. In: STOKES, A.; SPANOS, I.; NORRIS, J. E.; CAMMERAAT, E. (Eds.). **Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability**. Dordrecht: Springer. p. 21–30.
- EMBRAPA. EMBRAPA Solos. 2006. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 212p.
- FERNANDES, N. F. & AMARAL, C. P. 1996. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. (Eds.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 123-194.
- FERNANDES, N. F., GUIMARÃES, R. F., GOMES, R. A. T., VIEIRA, B. C., MONTGOMERY, D. R., GREENBERG, H. 2001. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas suscetíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2(1): 51-71.
- FERNANDES, N. F., GUIMARÃES, R. F., GOMES, R. A. T., VIEIRA, B. C., MONTGOMERY, D. R., GREENBERG, H. 2004. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modelling. **Catena**, 55: 163-181.
- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L., **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Curitiba: UFPR. 2009. 602 pp.
- FORNAZZARI NETO, L.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na folha Botuverá, SC. **Revista Brasileira de Geociências**, 33(2):197-208. 2003.

FRASCÁ, M. H. B. de O.; SARTORI, P. L. P. Minerais e rochas. In: OLIVEIRA, A. M. dos S. e BRITO, S. N. A. de. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE. p.15-38. 1998.

FRATINNI, P., CROSTA, G., CARRARA, A. 2010. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models, **Eng. Geol.**, 111: 62–72.

GEROY, I. J.; GRIBB, M. M.; MARSHALL, H. P.; CHANDLER, D. G.; BENNER, S. G.; MACNAMARA, J. P. Aspect influences on soil water retention and storage. **Hydrol. Process.** 25: 3836–3842. 2011.

GLCF. Global Land Cover Facility. **Data & Products: satellite imagery of Landsat TM.** Disponível em: <ftp://ftp.glcg.umd.edu/glcg/Landsat/WRS2/p220/r079/L5220079\_07920060905.TM-GLS2005>. Acesso em: 08 de março de 2012.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. 1984. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher. 194p.

GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO J., O. A.; GOMES, R. A. T. FERNANDES, N. F.; 2008. Movimentos de massa. In: FLORENZANO, T. G (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos. p. 159-184.

GRAY, D. 1995. Influence of vegetation on the stability of slopes. In: International Conference on the Interaction of Vegetation with Natural and Formed Slopes, 1994. Oxford: **Proceedings...**London: Thomas Telford. p.2-25.

GRAY, G.L. & LEISER, A.J. 1982. **Role of vegetation in stability and protection of slopes: biotechnical slope protection and erosion control**. New York: Van Nortrand Reinhol, p. 37-65.

GREENWAY, D.R. 1987. Vegetation and slope stability. In: ANDERSON, M.G. & RICHARDS, K.S. **Slope Stability**. John Wiley & Sons Ltd., 187–230.

HARTMANN, L.A.; et al. 1979. O Complexo Granulítico de Santa Catarina: descrição e implicações genéticas. **Acta Geológica Leopoldiensia**. 3(6): 93-112.

HARTMANN, LA.; SILVA, L.C.; ORLANDI, V. 1979. O Complexo Granulítico de Santa Catarina. **Acta Geológica Leopoldiensia**. 3(6): 93-112.

HAWKE, R.; McCONCHIE, J. 2011. In situ measurement of soil moisture and pore water pressures in an “incipient” landslide: Lake Tutira, New Zeland. **Journal of Environmental Management**. 92: 266-274.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. 2008. **The landslide handbook: a guide to understanding landslides**. Reston: Geological Survey.129p.

HOLTZ, R. D., KOVACS, W. D. 1981. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 733p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.– Divisão de Geociências do Sul 2002a. Projeto Gerenciamento Costeiro. 3ª fase. **Relatório Técnico Geologia**. Florianópolis. Disponível em: [www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Solos\\_final.pdf](http://www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Solos_final.pdf). Acessado em 24/10/2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.– Divisão de Geociências do Sul. 2002b. Projeto Gerenciamento Costeiro. 3ª fase. Relatório Técnico

- Geomorfologia. Florianópolis. Disponível em: [www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Geomorfologia.pdf](http://www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Geomorfologia.pdf). Acessado em 24/10/2012.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.– Unidade Estadual do IBGE em Santa Catarina. 2003. Projeto Gerenciamento Costeiro. 3ª fase. Relatório Técnico Solos. Florianópolis. Disponível em: [www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Solos\\_final.pdf](http://www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Solos_final.pdf)>. Acessado em 24/10/2012.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE 2004a. Folha Joinville – SG.22-Z-B. Escala: 1:250.000.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE 2004b. Folha Florianópolis – SG.22-Z-D. Escala: 1:250.000.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2012. **Estimativas da população residente nos municípios brasileiros com data de referência em 1º de julho de 2012**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em:< <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 28 de maio de 2013.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2012. **Manual técnico de uso da Terra**. 2ª ed. IBGE: Rio de Janeiro. 91p.
- IGLESIAS, C. M. da F.; ZERFASS, H.; da SILVA, M. A. S.; KLEIN, C. 2011. **Programa Geologia do Brasil: carta geológica - escala 1:250.000 (Folha SG-22-Z-B Joinville), Estado de Santa Catarina**. Brasília: DNPM/CPRM. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>>. Acesso em: 17 de setembro de 2012.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Índices de vegetação**. Disponível em:< <http://satelite.cptec.inpe.br/ndvi/>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2013.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese. 2ª ed. 2009.
- KAUL, P. F. T. 1980. O Cráton de Luís Alves. In: **Anais...CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 31, Balneário de Camboriu, 1980. Balneário de Camboriu: Sociedade Brasileira de Geologia, 1980, 5: 2677-2683.
- KAYASTHA, P.; DHITAL, M. R.; SMEDT, F. de. 2012. Landslide susceptibility mapping using the weight of evidence method in the Tinau watershed, Nepal. **Nat. Hazards**, 63:479–498.
- KEMP, L.D.; BONHAM-CARTER, G.F.; RAINES, G.L.; LOONEY, C.G. 2001. **ArcSDM: ArcView extension for spatial data modeling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis**. Disponível em: <http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>. Acessado em 17/09/2010.
- KLEIN, R. M. 1980. Ecologia da flora e vegetação do Vale do Itajaí. **Sellowia**, 31/32
- KÖEPPEN, W. **Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Econômica. 1948. 466p.
- KOZCIAK, S. 2005. Análise determinística da estabilidade de vertentes na bacia do rio Marumbi, Serra do Mar, Paraná. **Tese (Doutorado)**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná.

- LEE, S.; RYU, J.; KIM, I. 2007. Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea. **Landslides**. 4:327-338.
- LEITE, P. F. & KLEIN, R. M. 1990. Vegetação. In: **Geografia do Brasil: região sul**. Rio de Janeiro: IBGE. p.113-150.
- LEITE, P. F. As diferentes unidades fitoecológicas da região Sul do Brasil: proposta de classificação. **Dissertação (Mestrado)**. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 1994.
- LEVENTHAL, A. R.; MOSTYN, G. R. 1987. Slope stabilization and their application. In: WALKER, B. F. & FELL, R. (Eds.). Soil slope instability and stabilization. Rotterdam: AA Balkema. pp. 183-231.
- LIMA, G. M. de A.; BASTOS, L. C.; BELTRAME, A. da V. Correlação entre movimentos de massa e a cobertura vegetal na bacia do Braço do Baú, município de Ilhota – SC. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...Recife**: . 2008.
- LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. 2013. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman.
- MAC GREGOR, J. P.; MC MANUS, K. J. 1992. Management of lands subject to mass movement. In: Proc. of 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides Christchurch, New Zeland. Rotterdam: AA Balkema. pp. 1437-1444.
- MAGALHÃES, F. S.; CELLA, P. R. C. 1998. Estrutura dos maciços rochosos. In: OLIVEIRA, A. M. dos S. e BRITO, S. N. A. de. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE. p.39-55.
- MAGALHÃES, L. A.; SOUZA FILHO, C. R. de. 2009. Mapas de potencial mineral: aplicação da técnica de Pesos de Evidência (Weights of Evidence - WofE) para o mapeamento de áreas preditivas para ouro na região central do Amapá-AP. In: **Anais...XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009**. Natal: INPE. p. 4011-4018.
- MAGALHÃES, L. A. ; SOUZA FILHO, C. R. de. Mapas de potencial mineral: aplicação da técnica de Pesos de Evidência (Weights of Evidence - WofE) para o mapeamento de áreas preditivas para ouro na região central do Amapá-AP. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal: INPE. 2009. p. 4011-4018.
- MAGALHÃES, L. A. 2012. Integração e análise espacial de dados para a geração de modelos prospectivos de mineralizações auríferas na região de Amapari, Amapá. **Dissertação (Mestrado)**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo. 120p.
- MATHEW J. JHA, V. K., RAWAT, G. S. 2007. Weights of evidence modelling for landslide hazard zonation mapping in part of Bhagirathi valley, Uttarakhand. **Current Science**. v. 92(5):628 – 638.
- MATSUSHI, Y.; HATTANJI, T.; MATSUKURA, Y. 2006. Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrocks in the Boso Peninsula, Japan. **Geomorphology**, 76: 92-108.

- McKEAN, J.; BUCHEL, S.; GAYDOS, L. 1991. Remote sensing and landslide hazard assessment. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 57(9):1185 - 1193.
- MONTGOMERY, D. R. & DIETRICH, W. E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resource Research**, 30(4):1153-1171.
- MOORE, I. D.; GEISSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**. 57: 443-452.
- MOREIRA, C. V. R.; NETO, A. G. P. Clima e relevo. In: OLIVEIRA, A. M. dos S. e BRITO, S. N. A. de. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE. p. 69-85.
- MORGAN, R.P.C.; RICKSON, R.J. 1995. **Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach**. London: E & F Spon.
- NEUHÄUSER, B; TERHORST, B. 2007. Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to study area at the Jurassic escarpment (SW – Germany). **Geomorphology**, 86:12-24.
- OH, H.; LEE, S. 2011 Landslide susceptibility mapping on Panaon Island, Philippines using a geographic information system. **Environ Earth Sci**, 62:935–951.
- OZDEMIR, A. 2011. Landslide susceptibility mapping using Bayesian approach in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey). **Nat Hazards**, 59:1573–1607.
- PERDONCINI, L. C.; LEHNEN, R.; BORGES, A.; XAVIER, F. F. Mapa geológico do município de Blumenau: versão preliminar – escala 1:25.000. Blumenau: PREFEITURA MUNICIPAL DE BLUMENAU/DIRETORIA DE GEOLOGIA, ANÁLISE E RISCOS NATURAIS. **Não publicado**.
- PEREIRA, S., ZÊZERE, J. L., BATEIRA, C. Technical note: assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. **Nat. Hazards Earth Sci**. 12: 979-988.
- PHILLIPP, R. P.; MALLMANN, G.; BITENCOURT, M. de F.; SOUZA, E. R. de; SOUZA, M. M. A. de; LIZ, J. D. de; WILD, F.; ARENDT, S.; OLIVEIRA, A. S.; DUARTE, L.; RIVERA, C. B.; PRADO, M. 2004. Caracterização litológica e evolução metamórfica da porção leste do complexo metamórfico Brusque, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geociências**, 34(1):21-34.
- PINHEIRO, A.; SEVERO, D. L., 2010. Análise do Evento Pluviométrico Catastrófico de Novembro de 2008 na Região de Blumenau, SC. In: **Anais...XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2010, Belém: CBMET. 1:1-11.
- POLI, S.; STERLACCHINI, S. 2007. Landslide representation strategies in susceptibility studies using weights-of-evidence modeling technique. **Natural Resources Research**, 16(2): 121-134.
- POTTER, R. O.; CARVALHO, A. P.; FLORES, C. A. & BOGNOLA, I. 2004. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos. CD ROM; mapa color. (Embrapa Solos, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 46).
- POZZOBON, M.; SOARES, P. C.; PERDONCINI, L. C.; CARREIRÃO, H. M. C.; CURCIO, G. R. Análise de suscetibilidade a deslizamentos: aplicação do método probabilístico em um estudo de caso no município de Blumenau, Santa Catarina,

Brasil. In: **Anais...** I Congresso Brasileiro sobre Desastres Naturais. **Anais...** Rio Claro: UNESP. 2012.

PRANDINI, F. L.; FREITAS, C. G. L.; NAKAZAWA, V. A. 1992. A cartografia geotécnica na prevenção e mitigação dos impactos ambientais. **Anu. Inst. Geocienc.** 15: 173-180.

PRANDINI, F. L.; GUIDICINI, G.; BOTTURA, J. A.; PONÇANO, W. L.; SANTOS, A. R. 1976. Atuação da cobertura vegetal na estabilidade de encostas: uma resenha crítica. **Relatório n. 1.074.** São Paulo: IPT.

PRANDINI, F.L.; et al. Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. In: BITAR, O.Y. (Coord.). **Curso de geologia aplicada ao meio ambiente.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). 1995. p.187-202.

PRASANNAKUMAR, V. & VIJITH, H. 2012. Evaluation and validation of landslide spatial susceptibility in the western Ghats of Kerala, through GIS-based weights of evidence model and area under curve technique. **Jou. Geo. Soc. India**, 80: 515-523.

QIU, Y.; FU, B.; WANG, J.; CHEN, L. 2001. Soil moisture variation in relation to topography and land use in hillslope catchment of the Loess Plateau, China. **Journal of Hidrology.** 240:243-263.

QUINN, P. E., HUTCHINSON, D. J., DIEDERICHS, M. S., ROWE, R. K. 2010. Regional-scale landslide susceptibility mapping using the weights of evidence method: an example applied to linear infrastructure. **Can. Geotech. J.** 47:905-927.

REGMI, N. R., GIARDINO, J. R., VITEK, J. D. 2010. Assessing susceptibility to landslides: Using models to understand observed changes in slopes. **Geomorphology**, 122: 25–38.

REITZ, R.; KLEIN, R. M. & REIS, A. 1978. **Projeto madeira do Rio Grande do Sul.** Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues. 28/30: 3-320.

REMONDO, J.; BONACHEA, J.; CENDRERO, A. 2005. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment. **Landslides.** 2:321-328.

REVELLINO, P.; GUADAGANO, F. M.; HUNGR, O. 2008. Morphological methods and dynamic modeling in landslide hazard assessment of the Campania Apennine carbonate slope. **Landslides.** 5:59-70.

RODRIGUES, B. B. 2002. Proposta de sistemática para tomada de decisão relativa a movimentos de massa gravitacionais: aplicação em Ouro Preto (MG). **Tese (Doutorado).** Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro.

ROMANO, N.; PALLADINO, M. 2002. Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes. **Journal of Hidrology.** 265: 56-75.

ROSTIROLLA, S.P., 1991. Tectônica e Sedimentação da Bacia do Itajaí, SC. Ouro Preto. **(Dissertação) Mestrado.** Universidade Federal de Ouro Preto. 131 p.

ROSTIROLLA, S.P.; SOARES, P.C.; CHANG H.K. 1998. Bayesian and multivariate methods applied to favorability quantification in Recôncavo Basin and Ribeira Belt, Brazil. **Nonrenewable**, 7(1):7-24.



- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Eds.). 2006. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 306 p.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. 2005. Classificação hidrológica de solos brasileiros para estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 10(4):5-18.
- SASSA, K.; WANG, G.; FUKUOKA, H.; WANG, F. W.; OCHIAI, T.; SUGIYAMA, M.; SEKIGUCHI, T. 2004. Landslide risk evaluation and hazard zoning for rapid and long-travel landslides in urban development areas. **Landslides**. 1:221-235.
- SAWATZKY, D. L.; RAINES, G. L.; BONHANM-CARTER, G. F.; LOONEY, C. G., 2007. **Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.2 geoprocessing tools for spatial data modeling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks**. Disponível em: <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=15341>. Acessado em 11/06/2009.
- SCHROEDER, G. S. 2006. Análise tectônica da Bacia do Itajaí. **Dissertação (Mestrado)**. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- SCHWARZ, M.; LEHMANN, P.; OR, D. 2010. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes: from a bundle of roots to tree stands. **Earth Surf. Process. Landforms**. 35: 354–367.
- SELBY, M. J. 1982. **Hillslope materials and processes**. Oxford: Oxford University, 1982. 264 p.
- SEVEGNANI, L. 2002. Vegetação da Bacia do Itajaí em Santa Catarina. In: SCHÄFFER, W.B. & PROCHNOW, M. (org). **Mata Atlântica e Você: como preservar, recuperar e se beneficiar da mais ameaçada floresta brasileira**. Brasília: APREMAVI.
- SEVEGNANI, L.; VIBRANS, A. C.; GASPER, A. L. de. 2013. Considerações finais sobre a Floresta Ombrófila Densa e Restinga. In: VIBRANS, A. C.; SEVEGNANI, L.; GASPER, A. L. de; LINGNER, D. V. (eds.). **Inventário florístico florestal de Santa Catarina: Floresta Ombrófila Densa**. Blumenau: Edifurb. v.4. p. 325-327.
- SEVERO, D. A meteorologia do desastre. In: Frank, B.; Sevegnani, L. (Eds.). **Desastre de 2008: água, gente e política**. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí. p. 70-77.
- SIDLE, R. C.; PEARCE, A. J.; O'LOUGHLIN, C. L. 1985. **Hillslope stability and land use**. Washington DC: American Geophysical Union. 140p.
- SILVA DIAS, M. A. F. 2009. As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos. **Nota técnica**. São José dos Campos: INPE. 67p.
- SILVA, L. C. da; DIAS, A. de A. 1981. **Projeto Timbó-Barra Velha: carta geológica – escala 1:50.000 (Folha SG.22-Z-B-IV-4 Blumenau)**. Brasília: DNPM/CPRM.
- SILVEIRA, C. T. da. 2010. 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. **Tese (Doutorado em Geografia)**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

SILVEIRA, C. T. da.; OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; SIRTOLI, A. E.; SILVA, C. R.; BOTELHO, M. F. 2013. Soil prediction using artificial neural networks and topographic attributes. **Geoderma**, 195-196: 165-172.

SMALL, R. J. & CLARK, M.J. 1982. **Slopes and weathering**. Cambridge: Cambridge University Press. 112 p.

SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; BETTÚ, D. F.; HOLZ, M. 2007. Compartimentação estrutural da Bacia do Paraná: a questão dos lineamentos e sua influência na distribuição do aquífero Guarani. **Geociências**. 26(4):297-311.

SOARES, P. C.; FIORI, A. P., 1975. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas. **Notícia Geomorfológica**. 16(32): 71–104. 1975.

SOARES, P. C.; SOARES, A. P.; FIORI, A. P. 2002. Raciocínio probabilístico aplicado à suscetibilidade de escorregamentos: um estudo de caso em Campo Largo, Paraná, Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**. 51:59-76.

STERLACCHINI, S.; et al. Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps. **Geomorphology**. 125:51–61. 2011.

SUMMERFIELD, M. A. 1991. **Global Geomorphology: an introduction to the study of landforms**. Edinburgh: Pearson Prentice Hall. 537 p.

SWETS, J. A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. **Science**, 240: 1285–1293.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. 2008. Influência da vegetação na estabilidade de taludes na bacia do rio Ligeiro (PR). **Geociências**. 7(3): 387-399.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological Processes**. 5(1):81-100.

THOMAS, M. F. 1979. **Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates**. 2 ed. London: MacMillan. 1979. 332 p.

TRICART, J., 1972. **The landforms of the humid tropics, forests and savannas**. London: Longman. 1972. 306 p.

TSUKAMOTO, Y.; KUSAKABE, O. (1984) Vegetative influences on debris slide occurrences on steep slopes in Japan. **In**: Proc. symp. the effect of forest land use on erosion and slope stability, Honolulu, Hawaii, 63-72.

TUTTLE, S. D., 1970. **Landforms and landscapes**. Iowa: Brown. 1970. 136 p.

VALERIANO, M. de M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos. 2008. p.72-104.

VALERIANO, M. M. 2003. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 7(3): 539-546.

- VALERIANO, M. 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.
- VAN WESTEN, C. J.; RENGERS, N.; SOETERS, R. 2003. Use of geomorphological information in indirect landslides susceptibility assessment. **Natural Hazards**, 30: 399-419.
- VARNES, D. J. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice**. Paris: UNESCO. 1984. 63 p.
- VEDOVELLO, R.; MACEDO, E. S., 2007. Deslizamentos de encostas. In: **Vulnerabilidade Ambiental** (Santos, R. F. org.). Brasília: MMA. p. 75-93.
- VELOSO, H. P.; KLEIN, R. M. 1957. As comunidades e associações vegetais da mata pluvial do sul do Brasil - I. As comunidades do município de Brusque, estado de Santa Catarina. **Sellowia**, 9:81-235.
- VERGARI, F.; DELLA SETA, M.; DEL MONTE, M.; FREDI, P.; LUPA PALMIERI, E. 2011. Landslide susceptibility assessment in the Upper Orcia Valley (Southern Tuscany, Italy) through conditional analysis: a contribution to the unbiased selection of causal factors. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, 11:1475–1497.
- VIBRANS, A. C. 2003. A cobertura florestal da bacia do Rio Itajaí – elementos para uma análise histórica. **Tese (Doutorado)**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- VIBRANS, A. C.; McROBERTS, R. E.; LINGNER, D. V.; NICOLETTI, A. L.; MOSER, P. 2013. Extensão original e remanescentes da Floresta Ombrófila Densa em Santa Catarina. In: VIBRANS, A. C.; SEVEGNANI, L.; GASPER, A. L. de; LINGNER, D. V. (eds.). 2013. **Inventário florístico florestal de Santa Catarina: Floresta Ombrófila Densa**. Blumenau: Edifurb. v.4. p. 25-34.
- VIBRANS, A. C.; SEVEGNANI, L.; GASPER, A. L. de; LINGNER, D. V. 2013. **Inventário florístico florestal de Santa Catarina: Floresta Ombrófila Densa**. Blumenau: Edifurb. v.4. 576p.
- VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F. 2004. Landslides in Rio de Janeiro: the role played by variations in soil hydraulic conductivity. **Hidrol. process.** 18:791-805.
- VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; FILHO, O. A. 2010. Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Nat. Haz. Earth Syst. Sci.** 10: 1829-1837.
- WILSON, C. J.; DIETRICH, W. E. 1987. The contribution of bedrock groundwater flow to storm runoff and high pore pressure development in hollows. In: **Proc...Corvallis Symposium**. IAHS Publ, n° 165.
- WU, T. H. Root reinforcement: analyses and experiments. In: STOKES, A.; SPANOS, I.; NORRIS, J. E.; CAMMERAAT, E. (Eds). **Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability**. Dordrecht: Springer. 2007. p. 21–30.
- WU, W.; SIDLE, R. C. 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins. **Water resources research**, 31(8):2097-2110.
- ZARUBA, Q.; MENCL, V. 1982. **Landslides and their control: development in geotechnical engineering**. Amsterdam: Elsevier. 324 p.

ZINCK, J. A., LÓPEZ, J., METTERNICHT, G. I., SHRESTHA, D. P., VÁZQUEZ-SELEM, L. 2001. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 3 (1): 43–53.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. 2004. **Cartografia geotécnica**. São Paulo: Oficina de textos. 190p.

ZUQUETTE, L. V.; NAKAZAWA, V. A., 1998. Cartas de geologia de engenharia. In: OLIVEIRA, A. M. dos S. e BRITO, S. N. A. de. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE. p. 283-300.