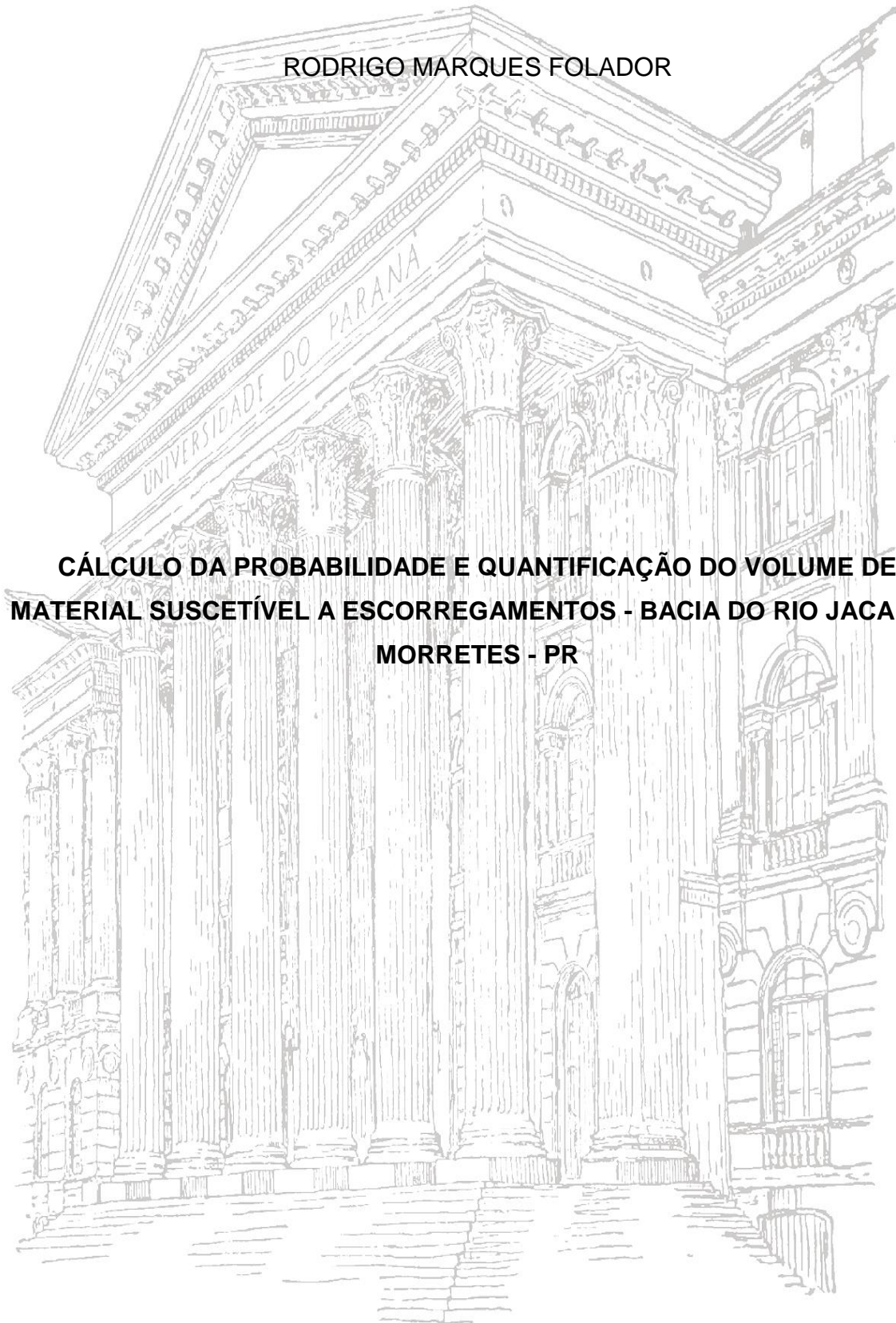


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RODRIGO MARQUES FOLADOR

**CÁLCULO DA PROBABILIDADE E QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME DE
MATERIAL SUSCETÍVEL A ESCORREGAMENTOS - BACIA DO RIO JACAREÍ,
MORRETES - PR**



CURITIBA
2015

RODRIGO MARQUES FOLADOR

**CÁLCULO DA PROBABILIDADE E QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME DE
MATERIAL SUSCETÍVEL A ESCORREGAMENTOS - BACIA DO RIO JACAREÍ,
MORRETES - PR**

Dissertação apresentada ao curso de Pós Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pio Fiori
Coorientador: Prof. Dr. Claudinei
Taborda da Silveira

CURITIBA
2015

F663c

Folador, Rodrigo Marques

Cálculo da probabilidade e quantificação do volume de material suscetível a escorregamentos - Bacia do Rio Jacareí, Morretes - PR/ Rodrigo Marques Folador. – Curitiba, 2015.

67 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2015.

Orientador: Alberto Pio Fiori – Co-orientador: Claudinei Taborda da Silveira.

Bibliografia: p. 65-67.

1. Escorregamentos (Geologia). 2. Sistemas de Informação Geográfica. 3. Análise volumétrica. 4. Jacareí, Bacia, Rio (PR). I. Universidade Federal do Paraná. II. Fiori, Alberto Pio. III. Silveira, Claudinei Taborda da. IV. Título.

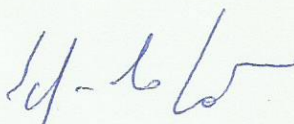
CDD: 551.307

TERMO DE APROVAÇÃO

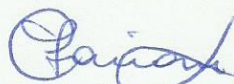
RODRIGO MARQUES FOLADOR

“Cálculo da probabilidade e quantificação do volume de material suscetível a escorregamento – Bacia do Rio Jacareí, Morretes - PR.”

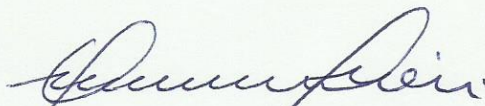
Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná. Comissão formada por:



Prof. Dr. Eduardo Salamuni - UFPR



Prof^a. Dr^a. Clarice Farian Lemos - UTFPR



Prof. Dr. Alberto Pio Fiori - UFPR
Presidente

Curitiba, 31 de março de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao **Programa de Pós-Graduação em Geologia** da Universidade Federal do Paraná; pela disponibilização de recursos físicos, humanos e financeiros para a realização deste trabalho e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (**CAPES**) pela bolsa durante todo o período.

Agradeço também ao **Professor Dr. Alberto Pio Fiori** pela atenção e conhecimento compartilhados, assim como ao **Professor Dr. Claudinei Taborda da Silveira**, por todas as conversas e ideias trocadas.

Ao **CESEC/LACTEC** por emprestar toda a estrutura e auxiliar na confecção dos ensaios necessários.

Gostaria também de agradecer toda a minha **família e amigos**, pela compreensão nos momentos críticos e por todo o apoio que me deram, principalmente à minha mãe, **Silmara** e em especial à minha querida esposa, **Gabrieli**, que foi minha luz e meu guia em vários momentos, assim como um exemplo em que procurei me espelhar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Área contemplada pela pesquisa, delimitada com base na bacia hidrográfica do rio Jacareí, Serra do Mar Paranaense.....	4
Figura 4-1 – Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa baseado em modelo de taxa de frequência.....	13
Figura 4-2 – Mapa de zonas de perigo de movimento de massa.....	16
Figura 4-3 – MDEs baseados em imagens SPOT-5; à esquerda modelos de antes do evento e à direita modelos de depois do evento.	17
Figura 4-4 - Alguns dos aspectos mais problemáticos para a determinação do risco de escorregamento. FONTE: Adaptado de VAN WESTEN <i>et al.</i> (2005).	20
Figura 5-1 - Exemplo de correção dos atributos topográficos. a- correção do sentido de fluxo das drenagens. b- correção das cotas hipsométricas.....	22
Figura 5-2 - a- Grade regular representando a superfície irregular do relevo, e os respectivos pontos com os valores de elevação. b- Janela representando os nove pixels.	25
Figura 5-3 - Representação dos modelos de direção de fluxo e acumulação de fluxo D8.....	27
Figura 5-4 - Exemplo de caracterização do tipo de solo, a partir da modelagem digital do relevo.....	29
Figura 5-5 - Equipamento utilizado para ensaio de cisalhamento direto: a - célula de cisalhamento, b - Marcadores de tensão cisalhante e deformação vertical, c - sistema de transmissão de carga.	34
Figura 5-6 – Curva Normal Reduzida. A área em vermelho representa a probabilidade de que a margem de segurança seja menor do que 0, em condições de ruptura.	35
Figura 5-7 – Histogramas de frequência. A, B e C: frequências de hipsometria, declividade e plano de curvatura respectivamente, na bacia do rio Jacareí; D, E e F: histogramas de frequência das cicatrizes, divididas nas classes das variáveis hipsometria, declividade e plano de curvatura respectivamente.	39
Figura 6-1 - MDEs gerados através de duas técnicas distintas: a- <i>Kriging</i> e b- <i>TopotoRaster</i>	42
Figura 6-2 - Imagem <i>Worldview</i> sobreposta ao MDE. Exagero vertical = 0,5.	42
Figura 6-3 - Modelos de relevo. À esquerda na legenda, os intervalos de classe e à direita, as reclassificações para gerar o mapa de solos. a- Classes de declividade; b- Classes de ITU; c- Classes de hipsometria; d- Classes de plano de Curvatura (FONTE: O autor, 2015).	44
Figura 6-4 - Classes de solo, definidas a partir dos valores de hipsometria, plano de curvatura, índice topográfico de umidade e declividade.....	45
Figura 6-5 - Mapa de solos definido com as cinco classes observadas em campo e com auxílio de imagem <i>Worldview-1</i>	46

Figura 6-6 - Modelos espaciais dos parâmetros físicos referentes às classes de solos da bacia do rio Jacareí.	47
Figura 6-7 - Gráficos de tensão normal x tensão cisalhante, com os respectivos valores de coesão e ângulo de atrito, referentes aos ensaios realizados nas amostras de solos da bacia do Jacareí.	48
Figura 6-8 - Modelo espacial do Fator de Segurança da bacia do rio Jacareí.	51
Figura 6-9 – Modelo espacial do Coeficiente de Segurança (Z_c).....	52
Figura 6-10 - Representação espacial da probabilidade de escorregamentos, a partir do coeficiente de segurança.....	53
Figura 6-11 – Mapa da probabilidade de escorregamentos, nas áreas das cicatrizes de 11 de março de 2011.	56
Figura 6-12 – Mapa do comprimento linear médio das cunhas com 45 a 50% de probabilidade de movimentação, representando áreas de muito alta suscetibilidade a escorregamentos.....	58
Figura 6-13 – Mapa do volume de material suscetível a escorregamentos, para as cunhas com muito alta probabilidade (45 a 50%).....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Taxa de frequência das ocorrências de movimentos de massa.	12
Tabela 4-2 - Intensidade do movimento de massa, agrupado em quatro classes, com base no volume estimado e na velocidade do movimento de massa.....	15
Tabela 4-3 - Classes de perigo de movimento de massa, cruzando parâmetros de intensidade e frequência estimada.....	15
Tabela 4-4 - Comparação do volume estimado de movimento de massa dos resultados obtidos, com volumes reais calculados por fotogrametria aérea e LIDAR	18
Tabela 5-1 - Probabilidade determinada com base nos valores de Z_c aplicados à tabela de distribuição normal.....	37
Tabela 6-1 - Comparação dos índices físicos de solo das bacias do Marumbi e do Jacareí.	49
Tabela 6-2 – Intervalos de probabilidade e a respectiva porcentagem de cicatrizes de escorregamentos dentro dos intervalos.	54
Tabela 6-3 – Volume determinado para cada cunha de escorregamento, apresentada na Figura 6-12.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANUDEM - *Australian National University Digital Elevation Model*

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

CESEC - Centro de Estudos em Engenharia Civil

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EV – Exagero Vertical

IAP - Instituto Ambiental do Paraná

ITU – Índice Topográfico de Umidade

LAGEO – Laboratório de Pesquisas aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias

LIDAR - *Light Detection and Ranging*

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDL - *Laser Distance Meter*

MINEROPAR – Minerais do Paraná (Serviço Geológico do Paraná)

PE – Potencial de Escorregamento

SAD - *South American Datum*

SHALSTAB - *Shallow Slope Stability Model*

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SINMAP - *Stability Index Mapping*

SPOT - *Satellite Pour l'Observation de la Terre*

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UTM - *Universal Tranverse Mercator*

VGs – Variáveis Geomorfométricas

Zc – Coeficiente de Segurança

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	2
2	OBJETIVOS.....	3
3	ÁREA DE ESTUDO	4
3.1	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMORFOLÓGICA.....	5
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	8
4.1	MODELAGEM DIGITAL DO RELEVO	8
4.2	ROTINAS PARA MAPEAMENTO DA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS.....	9
4.3	TÉCNICAS PARA O CÁLCULO DA PROBABILIDADE	10
4.4	A QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME	16
5	MATERIAIS E MÉTODOS	21
5.1	ORGANIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS	21
5.2	MODELAGEM DO FATOR DE SEGURANÇA	23
5.2.1	Método de obtenção do MDE.....	24
5.2.2	Modelagem dos atributos topográficos.....	25
5.2.2.1	Valores atribuídos a cada classe	28
5.2.3	Caracterização do tipo de solo	28
5.2.4	Modelagem do Fator de Segurança	30
5.2.4.1	O ensaio de cisalhamento direto	33
5.3	MODELAGEM DIGITAL DA PROBABILIDADE DE ESCORREGAMENTOS	34
5.4	MODELAGEM COM BASE NAS VARIÁVEIS GEOMORFOMÉTRICAS (VG).....	37
5.5	QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME	39
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
6.1	O MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	41

6.2	MAPA DE SOLOS.....	43
6.2.1	Análise do solo com base nos atributos de relevo	43
6.3	MODELAGEM DO FATOR DE SEGURANÇA.....	46
6.3.1	Ensaio de cisalhamento.....	48
6.3.2	Mapa do Fator de Segurança.....	50
6.4	MODELO ESPACIAL DE PROBABILIDADE.....	52
6.5	MODELO ESPACIAL DE PROBABILIDADE COM BASE NAS VG ...	55
6.6	MAPA DO VOLUME DE MATERIAL SUSCETÍVEL A ESCORREGAMENTOS	57
7	CONCLUSÕES.....	62
	REFERÊNCIAS	65

RESUMO

No dia 11 de março do ano de 2011, nos municípios de Morretes e Paranaguá, ocorreram diversos movimentos de massa que destruíram casas, pontes e inclusive vidas de moradores locais. Após o evento foram realizadas uma série de tentativas para entender os processos e gerar os produtos que auxiliassem na prevenção de tais catástrofes, resultando em muitos projetos satisfatórios, muitas informações e mapas adquiridos, porém sempre com a necessidade de aperfeiçoamento. O objetivo do trabalho é quantificar o volume de material suscetível a escorregamentos, através de um método que sirva de auxílio na prevenção de movimentos de massa. É uma técnica que permite a quantificação do volume de massa movimentada a partir do cálculo da probabilidade de ocorrência dos escorregamentos. Utilizando a bacia hidrográfica do Rio Jacareí como exemplo, foi gerado em ambiente SIG um modelo digital de elevação e a partir deste, realizados os processamentos dos atributos topográficos utilizados para atribuir valores a um mapa de solos por meio de álgebra de mapas. A partir dos tipos de solo, foram extraídos os parâmetros físicos do solo, através de ensaios de cisalhamento direto e de análises de trabalhos anteriores. O cálculo do Fator de Segurança foi realizado em ferramenta SIG, que possibilita calcular equações aplicadas a grids espacializadas. Para o cálculo da probabilidade de escorregamentos, foi utilizado o desvio padrão do Fator de Segurança. O volume de solo desmoronado é dado pelo produto da área da cunha instável de solo, pelo comprimento linear do sulco propenso ao desmoronamento, estimado pela probabilidade encontrada. Como resultados, foi possível observar os principais focos de risco na área da bacia, nos relevos mais acidentados. Calculado o desvio padrão do Fator de Segurança, foram obtidos os valores do coeficiente de segurança e reclassificados com base em uma tabela de distribuição normal, resultando na probabilidade. Os valores mostraram áreas com alta probabilidade principalmente ao Sul da bacia. A partir dos valores encontrados, as áreas mais suscetíveis foram separadas por classes referentes às probabilidades determinadas e posteriormente utilizadas para o cálculo do volume de material suscetível a escorregamentos.

Palavras chave: probabilidade de escorregamentos, SIG, bacia do Jacareí, quantificação do volume

ABSTRACT

On March 11 of 2011, in the cities of Morretes and Paranaguá, there were several mass movements that destroyed homes, bridges and even lives of locals. After the event a number of attempts were made, to understand the processes and generate products that would help in the prevention of such disasters, resulting in very satisfactory projects, many acquired information and maps, but always with the need for improvement. The objective is to quantify the volume of material susceptible to landslides, by a method that serves to aid in the prevention of mass movements. It is a technique that allows the quantification of the heaving mass volume by calculating the probability of occurrence of landslides. Using the watershed of the Rio Jacarei for the study, was generated in SIG a digital elevation model and from this, made the processing of topographic attributes that were used to assign values to the soil map by map algebra. From the types of classified soil were extracted from each class the physical parameters of the soil through direct shear tests and literature analyzes, which are needed to calculate the safety factor of the strands, using the limit equilibrium method. Calculation of Safety Factor was conducted in GIS tool, which allows calculating equations applied to spacialized grids. To calculate the landslides probability, the standard deviation of the safety factor was used. The volume of collapsed soil is given by the product of the area of unstable soil wedge, the linear length of the groove prone to landslide, estimated by the probability found. As a result, we observed the main risk of outbreaks in the area of the basin, in the most rugged terrain parties. Calculated the standard deviation of the safety factor, the Z_c values were obtained and reclassified based on the normal distribution table, which showed areas with high probability the southern basin outbreaks, close to the areas of landslide March 11, 2011. From the found probability values, susceptible areas are separated by equal percentages classes relating to certain probabilities, and higher were used to calculate the volume of material susceptible to landslides.

Keywords: probability of landslides, GIS, basin Jacarei, quantifying the volume

1 INTRODUÇÃO

Em março do ano de 2011, os municípios de Morretes e Paranaguá foram foco das atenções, devido à destruição provocada por movimentos de massa que atingiram algumas comunidades, carregando casas, pontes e tirando a vida de moradores. Apesar da rápida recuperação da vegetação, ainda é possível ver as grandes cicatrizes dos escorregamentos que marcaram a Serra da Prata.

Após o evento a MINEROPAR (Minerais do Paraná) e a UFPR (Universidade Federal do Paraná) realizaram uma série de tentativas para entender os processos e gerar produtos que auxiliam na prevenção de tais catástrofes. Muitos projetos satisfatórios, muitas informações e mapas foram adquiridos, porém ainda há certa dificuldade em montar um sistema completo que seja efetivo na prevenção desses eventos, principalmente por fazerem parte da dinâmica evolutiva da Serra do Mar.

Selby (1985) atribuía a gravidade como principal fator condicionante para os movimentos de massa, sem mencionar a influência direta da água, vegetação, ângulo de atrito, e outros parâmetros. Com o passar dos anos e o aperfeiçoamento das técnicas e métodos, novos parâmetros foram incorporados nas análises das movimentações das encostas, junto com a força da gravidade. Pode-se dizer então que o primeiro passo para determinar e entender os movimentos de massa, é caracterizar os parâmetros do meio físico que influenciam os processos e conseguir relacioná-los.

Importante também, além de entender os parâmetros que influenciam nos processos de movimentação, é a busca de um método que seja válido para prever tais eventos, de modo a minimizar os danos materiais, o número de vítimas e demais perdas. Para isso, diversas técnicas são testadas, com base no tipo de processo que esteja ocorrendo, porém é difícil dizer que uma técnica seja completamente eficaz, uma vez que o que se tenta prever são movimentos naturais, que fazem parte da evolução do relevo.

Com esse intuito, esta pesquisa servirá como ferramenta de auxílio para a compreensão dos eventos relacionados aos escorregamentos. Os movimentos de massa são importantes agentes externos modeladores do relevo em encostas, causados pela diminuição da resistência do solo ou rocha. São vários os fatores que

condicionam esses movimentos e, por isso, é difícil afirmar quando e onde irão ocorrer.

Atualmente, para prever tais eventos, aplicam-se técnicas como a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o tratamento dos dados geológicos, planialtimétricos, geomorfológicos, dentre outros, que resultam em modelos utilizados como ferramentas de auxílio e mapas com informações sobre as áreas de suscetibilidade a movimentos de massa, sempre aperfeiçoando as informações dos modelos, a fim de disponibilizá-los ao público com mais detalhes e com mais rapidez para sua utilização.

1.1 JUSTIFICATIVA

A dinâmica natural das áreas com maiores declividades e grandes elevações é a causa para a instabilidade das encostas e é algo que pode ser previsto, porém não sanado. Com isso, há uma grande necessidade pelo aperfeiçoamento dos modelos e das técnicas existentes, na tentativa de minimizar todos os danos causados pelos movimentos de massa, buscando compreender os agentes causadores desses movimentos e utilizando novas técnicas mais eficazes para a prevenção, diminuindo o impacto sobre as comunidades que vivem nos locais atingidos.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal é aplicar o método de quantificação do volume de material suscetível a escorregamentos proposto por Fiori e Carmignani (2009) em um SIG (Sistema de Informações Geográficas), gerando modelos que representem espacialmente as áreas com maior probabilidade de movimentação e o consequente volume de material movimentado.

Para atingir o objetivo geral do trabalho, foi necessário cumprir alguns objetivos específicos, dentre os quais, estão:

- a) A geração de um Modelo Digital de Elevação (MDE) com parâmetros para a representação adequada do relevo, determinando a escala ideal para representação dos detalhes.
- b) Classificar os tipos de solos através da análise de feições de relevo, considerando a declividade, plano de curvatura das vertentes, Índice Topográfico de Umidade (ITU) e hipsometria.
- c) Calcular o Fator de Segurança das encostas, e consequentemente o desvio padrão do FS que deve ser utilizado para determinar a probabilidade de escorregamentos.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área contemplada pela pesquisa é a bacia do rio Jacareí, situada nos municípios de Morretes e Paranaguá, na Serra do Mar do Paranaense. É uma área de aproximadamente 40 km², situada entre as coordenadas do sistema UTM 730000 a 735663, 7177363 a 7163965, do datum Sirgas 2000, como mostra a Figura 3-1. Possui fácil acesso, sendo que localiza-se próxima à BR277 que liga Curitiba a Paranaguá, e possui estrada de chão até a comunidade de Floresta, na base da Serra da Prata, em sua face Oeste. Para acessar as vertentes da bacia o acesso é complicado, uma vez que o local possui áreas com mais de 45° de inclinação. É considerada uma área de proteção, por ser parte da Floresta Atlântica, sendo necessária autorização do Instituto Ambiental do Paraná (IAP) para a realização das pesquisas.

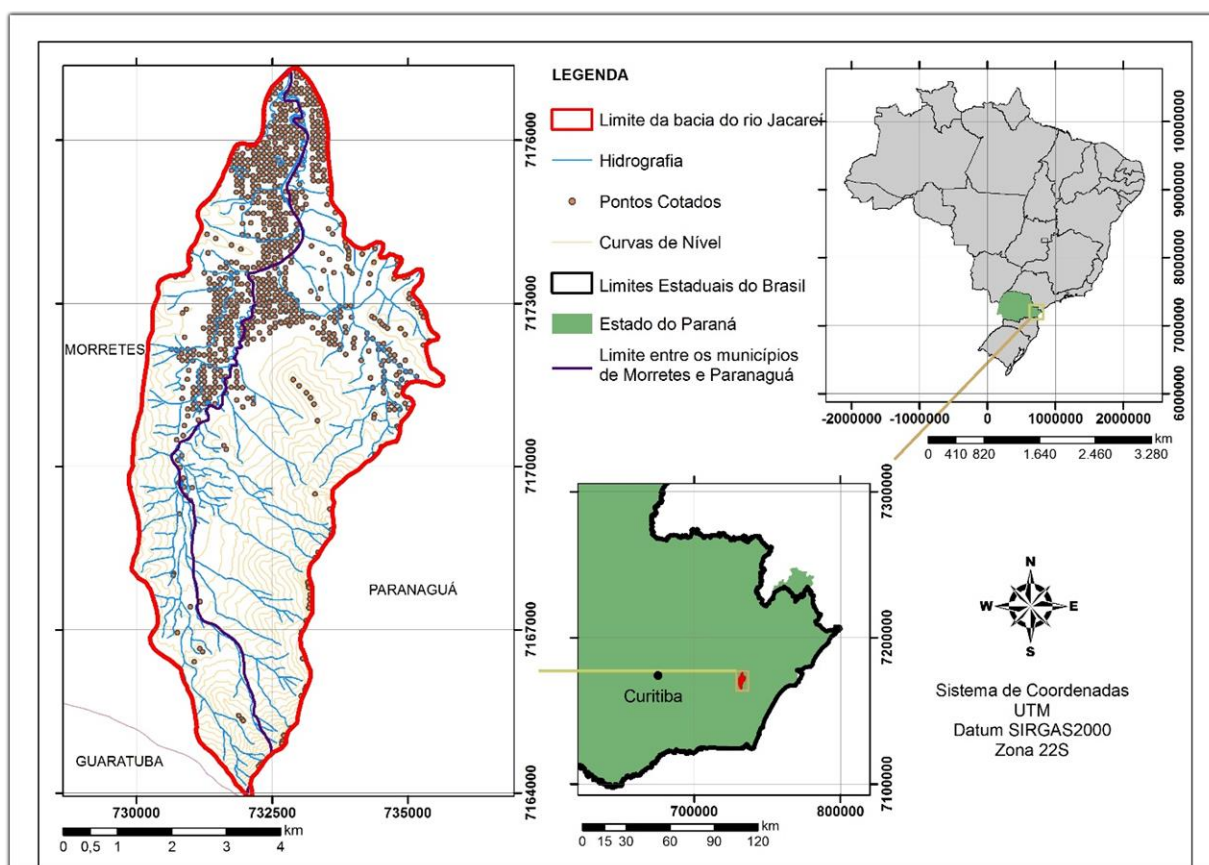


Figura 3-1 - Área contemplada pela pesquisa, delimitada com base na bacia hidrográfica do rio Jacareí, Serra do Mar Paranaense.

FONTE: O autor (2015).

3.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMORFOLÓGICA

Oka-Fiori *et al.* (2006) Citam a Serra do Mar como pertencente ao Cinturão Orogênico do Atlântico, que tem sua gênese vinculada a vários ciclos geotectônicos, sedimentações, metamorfismos regionais, falhamentos, dobramentos e extensas intrusões, sendo que no Paraná as faixas que o compõe estão dispostas em direções nordeste-sudoeste. A serra do mar está limitada pelo Grupo Açungui a Norte e estende-se até a zona litorânea, compondo uma complexa associação de rochas metamórficas de alto grau do Proterozóico Inferior, com migmatitos, gnaisses, granulito e xistos subordinados.

Os autores atribuem estas rochas ao Complexo Máfico Ultramáfico Pien, Complexo Gnaissico Migmatítico Costeiro, Suite Gnaissica Morro Alto, Formação Rio das Cobras e Batólito Paranaguá. Na mesma faixa são observadas porções lenticulares das rochas mais antigas do Paraná, atribuídas ao Arqueano, pertencentes ao Complexo Granulítico Serra Negra. Há ainda corpos de granitos neoproterozoicos e rochas vulcânicas da Formação Guaratubinha, formados durante o processo de consolidação do embasamento na Plataforma Sul-Americana, dando suporte a grandes setores da Serra do Mar.

Almeida e Carneiro (1998) afirmam que a direção geral da Serra do Mar acompanha a orientação ENE das estruturas do Escudo Atlântico, porém em mapas de maior escala a crista das escarpas é extremamente festonada (PONÇANO *et al.*, 1981 *apud* ALMEIDA e CARNEIRO, 1998), acompanhando estruturas menores, falhas e obedecendo à influência decisiva de corpos rochosos resistentes à denudação. A ampla variedade de tipos litológicos expostos é explicada pela história complexa registrada entre o Pré-cambriano e o Eopaleozóico, de origem das diversas associações migmatíticas e metamórficas, além dos inúmeros complexos ígneos.

De acordo com os autores, os núcleos arqueanos e proterozóicos são englobados por rochas e estruturas representativas de três grandes colagens proterozóicas vinculadas aos supercontinentes Atlântica, Rodínia e Gondwana Ocidental, que formaram faixas móveis acrescionárias, colisionais ou transpressionais. Essas faixas móveis circundam núcleos menores que foram reestruturados e afetados pela orogenia transamazônica.

A origem da Serra do Mar está, portanto, relacionada à separação continental entre a América do Sul e a África, iniciada há 150 milhões de anos com o surgimento

do Oceano Atlântico, sendo que no processo de separação continental ocorreu um amplo soerguimento em toda a borda leste do continente. Este soerguimento ocasionou levantamento e rebaixamento de grandes blocos por processos de falhamentos.

Oka-Fiori *et al.* (2006) citam a Serra do Mar como uma faixa de encostas com vertentes abruptas que margeiam o Planalto Atlântico desde a divisa do Estado de Santa Catarina e o Estado do Paraná, até a divisa com o Estado de São Paulo, na região do Vale do Ribeira de Iguape, e nesta faixa predominam formas de relevo denudacionais, constituídas basicamente por escarpas e cristas com topos aguçados e topos convexos. O relevo é bastante dissecado e a drenagem apresenta um padrão dendrítico, adaptado às direções das estruturas relacionadas às falhas, fraturas e contatos litológicos, que condicionam o padrão de drenagem em treliça com trechos com traçado retilíneo e incisões em ângulos agudos, mostrando a influência de direções estruturais importantes.

A bacia hidrográfica do rio Jacareí pertence ao compartimento morfoescultural Serra do Mar e apresenta dissecação alta, ocupando uma área de 2065,52 km². O relevo apresenta um gradiente de 1400 metros com altitudes variando entre 20 e 1400m. As formas predominantes da bacia são topos alongados e cristas com vertentes retilíneas e vales em “V” encaixado. A direção geral da morfologia varia entre NE-SW, N-S e NW-SE (OKA-FIORI *et al.*, 2006).

Nascimento (2013) determinou três unidades geomorfológicas distintas para a bacia, que são Serra do Mar, relevo ondulado e planície. Para a Unidade Serra do Mar, considerou o relevo fortemente ondulado, com domínio de topos angulares, amplitudes acima de 200m e declividades altas, caracterizando a unidade na porção sul da Bacia e ocupando em média a metade da área total. O relevo suave ondulado foi identificado pela diminuição de ondulações e uma transição entre a serra e a planície, caracterizado por morros e morrotes, sendo que os morros constituem médias elevações com domínios de topos arredondados, amplitudes entre 100 e 200m e altas declividades, já os morrotes são baixas elevações, topos arredondados, amplitudes entre 20 e 60m e declividades altas. As planícies foram identificadas pelos terrenos baixos e planos, formados pela acumulação de sedimentos.

As cicatrizes dos principais escorregamentos mostram que a bacia do rio Jacareí está sobre uma soleira migmatítica e sobre esta, nas grandes elevações, ocorrem rochas ígneas graníticas que constituem grandes corpos intrudidos, formados

há aproximadamente 550 milhões de anos e devido à erosão diferencial conferem à Serra do Mar características distintas, pois como são mais resistentes à erosão do que suas encaixantes metamórficas, acabam preservadas formando altos topográficos. A Serra da Prata é um exemplo, na qual a bacia hidrográfica do rio Jacareí é pertencente. São observados ainda diversos diques básicos cortando as rochas migmatíticas, com direção preferencial E-W.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Os autores e respectivas pesquisas citados neste capítulo também estudam áreas que apresentam eventos de movimentações, realizando a aplicação de técnicas que tem o objetivo de entender a dinâmica do ambiente suscetível a esses eventos e consequentemente apresentando novas ou aperfeiçoadas metodologias. Porém quando observadas e comparadas é possível perceber que são técnicas que apresentam resultados qualitativos, ou seja, que determinam muitas vezes as áreas suscetíveis a movimentos de massa, áreas de risco, ou áreas de perigo de escorregamentos, porém que não utilizam ou se focam na quantificação numérica de seus resultados.

Existem métodos quantitativos que podem ser utilizados para a análise da suscetibilidade a escorregamentos, porém não são frequentes e geralmente são mais complexos. Desta forma é possível perceber que os métodos qualitativos são os mais comuns e alguns são comparados neste capítulo.

A base para realizar um trabalho como o proposto, é compreender os fatores que condicionam o processo de escorregamentos. Para isso, são necessárias várias etapas, partindo de uma simples análise do relevo e de seus atributos, até atingir o resultado final, que é a quantificação dos escorregamentos. Sendo assim, entre as etapas necessárias estão a geração de modelos digitais de elevação, análises do Fator de Segurança, cálculos da probabilidade de escorregamentos e por fim o cálculo do volume. Estas são algumas das etapas necessárias e as mais importantes para o desenvolvimento do tema. Partindo destes métodos de análises, procura-se neste capítulo revisar o estado da arte, baseando-se nas etapas citadas.

4.1 MODELAGEM DIGITAL DO RELEVO

A modelagem digital do terreno constitui uma ferramenta muito utilizada para a caracterização dos atributos topográficos, devido à rapidez e qualidade dos resultados. A análise digital do terreno quantifica as características morfológicas de uma forma contínua, ou seja, gerando uma malha constituída por diversas células, em

que para cada uma é atribuído um valor que representa a característica da superfície do relevo naquele ponto.

A distribuição dos atributos topográficos pode ser usada como medida indireta da sua variação espacial e permite que essas variações sejam cartografadas usando técnicas relativamente simples. Muitos SIG estão sendo desenvolvidos para armazenar dados primários referentes às informações topográficas, entre eles estão os webmapas referentes aos projetos GEOTEC, BR376 e Litoral PR, do Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias da Universidade Federal do Paraná (LAGEO).

Burrough e McDonnell (1998) sumarizam todos os atributos que podem ser computados a partir de um MDE, estando entre eles a elevação, declividade, o aspecto do terreno, plano e perfil de curvatura, direção do fluxo da drenagem, dentre outros. Os autores descrevem o método mais utilizado para a discretização espacial contínua, que consiste em passar uma janela quadrada (ou um *kernel*) sobre a superfície e computar um novo valor da célula central desse *kernel*, como uma função dos valores das células cobertas pela janela, geralmente com tamanho de 3x3, ou seja, para uma célula de 5 metros, uma janela 3x3 representará uma área de 225m². Podem ainda ser utilizadas janelas de 5x5 e 7x7. A operação é conhecida como convolução.

4.2 ROTINAS PARA MAPEAMENTO DA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS

Geralmente para a elaboração de modelos de previsão de escorregamentos, dados planialtimétricos são utilizados. Estes dados são aplicados em rotinas, criadas com o objetivo de entender e modelar as áreas de suscetibilidade.

O modelo SHALSTAB (*Shallow Slope Stability Model*) é uma dessas rotinas, e vem sendo utilizado há alguns anos, privilegiando os parâmetros topográficos como fatores para os escorregamentos nas vertentes (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994). Este método combina um modelo hidrológico de relação entre a concentração de água e a transmissividade do solo para determinar níveis de saturação, e um modelo de estabilidade de encosta baseado na saturação e nos parâmetros de solo, como coesão e espessura do material.

Assim como o SHALSTAB, outro modelo utilizado para a estabilidade de taludes é o SINMAP (*Stability Index Mapping*), que analisa os componentes desestabilizadores da gravidade e os componentes de resistência ao movimento, como ângulo de atrito e coesão, em um plano de movimento paralelo à superfície. O modelo deriva de classificações de estabilidade de taludes com base na declividade, na área de captação e em parâmetros de quantificação das propriedades materiais e climáticas (PACK *et al.*, 1998).

Silveira *et al.* (2012) empregam um modelo preditivo utilizando método determinístico para a análise do Fator de Segurança das vertentes, utilizando as propriedades físicas e mecânicas dos solos, formas de relevo e cobertura vegetal, integradas a um sistemas de informações geográficas. A validação é feita através do mapeamento de cicatrizes de deslizamentos ocorridos na área de estudo.

4.3 TÉCNICAS PARA O CÁLCULO DA PROBABILIDADE

Para a análise da probabilidade a escorregamentos, dois trabalhos foram citados, LEE e PRADHAN, 2006; CARDINALI *et al.*, 2002, que representam as atuais técnicas mais comuns para o cálculo da probabilidade. Estes autores representam duas grandes escolas de estudo de áreas de risco, que são a escola Italiana e a Asiática.

Lee e Pradhan (2006) afirmam que por meio de uma análise científica dos parâmetros responsáveis pelos escorregamentos, é possível avaliar e prever áreas de risco de deslizamentos e diminuir o dano usando planos emergenciais. Afirmam ainda que existem três passos para a análise dos escorregamentos: suscetibilidade, perigo e risco.

Isso significa que o objetivo do trabalho é definir o que pode ser considerado na análise de um escorregamento, porém nesse caso não é apresentada uma quantificação dos valores.

Para os autores a análise de risco é uma técnica válida, mas deve levar em conta a probabilidade, bem como o impacto esperado e esta última deve ser expressa com relação ao tamanho da população em risco. Para os autores, um pressuposto

fundamental ao se usar a relação frequência-probabilidade, é que a possibilidade de ocorrência dos escorregamentos compara-se à atual frequência destes movimentos.

Lee e Pradhan (2006) reforçam a relação frequência-probabilidade, afirmando que o índice de frequência é o índice da área em que os escorregamentos ocorreram, para a área de estudo total e é também a taxa das probabilidades de ocorrência de um escorregamento para uma não ocorrência, para o atributo de um dado parâmetro.

A partir dessa afirmativa, detectaram as áreas de ocorrência dos eventos, interpretando fotografias aéreas e através de análise direta de campo. Em seguida geraram um mapa com os locais a partir das fotografias aéreas, combinado com dados em GIS e utilizaram para avaliar a frequência e distribuição dos escorregamentos superficiais na área de estudo.

Os autores consideraram como fatores de instabilidade a litologia e estruturas de superfície, sismicidade, declividade e morfologia, evolução do fluxo, condições da água subterrânea, clima, cobertura da vegetação, uso do solo e atividade humana (Tabela 4-1). Esses fatores relacionados aos escorregamentos, foram organizados em um banco de dados espacial.

Tabela 4-1 - Taxa de frequência das ocorrências de movimentos de massa.

Fator	Classe	Número Total de Pixels		Pixels com ocorrência de Escorregamentos		Taxa de Frequência	
		Número	%	Número	%		
Declividade	0 - 15 graus	1709800	57.87	53	11.45	0.20	
	16 - 25 graus	765189	25.90	152	32.83	1.27	
	26 - 35 graus	360229	12.19	157	33.91	2.78	
	> 35 graus	119564	4.05	101	21.81	5.39	
Aspecto	Planície	1199400	40.59	13	2.80	0.07	
	Norte	206629	6.99	41	8.85	1.27	
	Nordeste	207860	7.03	51	11.01	1.57	
	Leste	228674	7.74	60	12.95	1.67	
	Sudeste	236988	8.02	82	17.71	2.21	
	Sul	205108	6.94	58	12.53	1.80	
	Sudoeste	206970	7.01	52	11.23	1.60	
	Oeste	228117	7.72	54	11.66	1.51	
Curvatura	Noroeste	235036	7.95	52	11.23	1.41	
	Côncavo	770757	26.09	50	10.80	0.41	
	Plano	1419529	48.04	45	9.72	0.20	
	Convexo	764496	25.87	368	79.48	3.07	
	Distância da Drenagem	0- 50 m	919481	31.11	117	25.26	0.81
		51 - 100m	648322	21.94	114	24.62	1.12
		101 - 150 m	453610	15.35	80	17.27	1.13
		151 - 200 m	299500	10.13	53	11.44	1.13
201 - 250 m		189645	6.41	41	8.85	1.38	
251 - 300 m		120824	4.08	14	3.02	0.74	
> 301 m	323400	10.94	44	9.5	0.87		
Geologia	Micro Granito	43801	1.52	7	1.512	0.98	
	Aluvião	668834	23.34	2	0.432	0.01	
	Granito	2151905	75.12	454	98.056	1.305	
Solo	Associação Rengam - bukit temiang	289450	10.03	96	20.73	2.07	
	Associação Selangor - kangkong	34197	1.18	0	0.00	0.00	
	Associação aluvionar - coluvionar	373655	12.94	13	2.81	0.22	
	Série Serong	80436	2.79	0	0.00	0.00	
	Seep Land	1506818	52.20	341	73.65	1.41	

FONTE: Adaptado de LEE e PRADHAN (2006).

Para concluir o trabalho, Lee e Pradhan (2006) calcularam o índice de frequência para cada intervalo ou tipo de fator, dividindo o índice de ocorrência de escorregamento pelo índice da área e após, geraram os mapas finais de suscetibilidade (Figura 4-1).

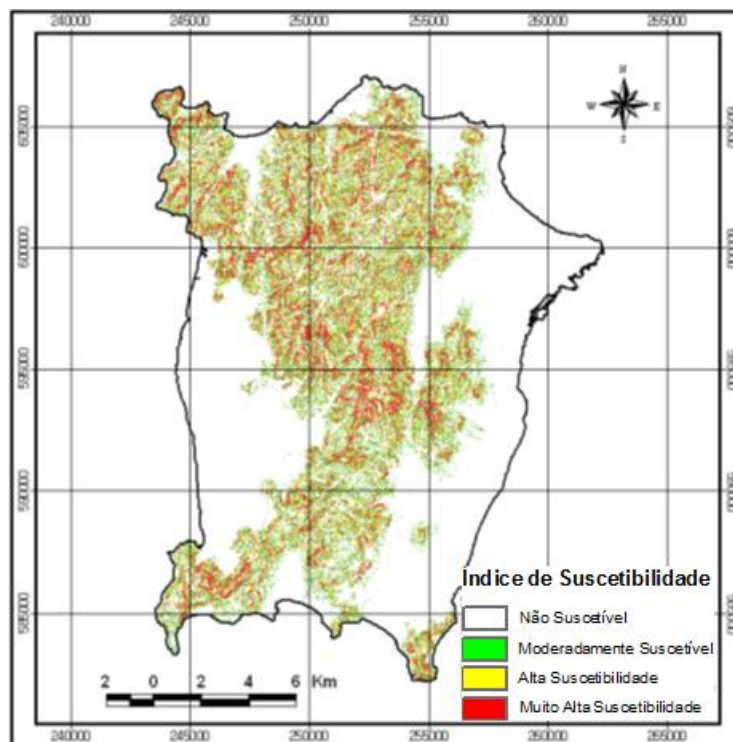


Figura 4-1 – Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa baseado em modelo de taxa de frequência.

FONTE: Adaptado de LEE e PRADHAN (2006).

Cardinali *et al.* (2002) dizem que a abundância dos escorregamentos varia de acordo com o litotipo, que caracteriza uma configuração geomorfológica prevaiente e por propriedades geotécnicas e hidrológicas típicas. Afirmam que a suscetibilidade a escorregamentos refere-se às condições naturais de uma área potencialmente sujeita a movimentação por inclinação, e que é definida como a probabilidade de ocorrência de um escorregamento de uma dada magnitude, em um período de tempo pré-definido e em uma dada área.

A definição de suscetibilidade de Cardinali *et al.* (2002) utiliza os conceitos de frequência, intensidade e localização no espaço. Para os autores, idealmente, um mapa de suscetibilidade irá conter o local e probabilidade de ocorrência dos movimentos de massa das magnitudes pré definidas na área de estudo. Porém afirmam que na prática raramente é possível definir a suscetibilidade e a vulnerabilidade como probabilidades, que reduzem os limites de rigor para a aplicação da definição do risco de movimento de terra. A vulnerabilidade deve incluir considerações sobre o tipo de queda (tamanho, forma, volume e velocidade). Afirma

também que a avaliação da vulnerabilidade de um elemento em risco é dificultada pelo fato de que o mesmo elemento pode responder bem a um certo tipo de movimentação e responder mal em um diferente tipo de movimento de terra.

O trabalho desses autores segue os seguintes passos para a aplicação do método apresentado:

- a) Definição da extensão da área de estudo;
- b) Produção de um mapa com o inventário multi-temporal dos movimentos de massa;
- c) Definição das zonas suscetíveis a movimentos de massa no entorno dos únicos ou múltiplos movimentos de massa existentes;
- d) Identificação e mapeamento dos elementos em risco e avaliação de sua vulnerabilidade a diferentes tipos de movimentos;
- e) Avaliação do risco.

Para Cardinali *et al.* (2002), um pressuposto para a aplicação do modelo, é que os movimentos de massa tendem a ocorrer (no tempo e espaço) no interior ou nas proximidades de outros escorregamentos, ou na mesma declividade ou mesma bacia hidrográfica, fazendo com que o conhecimento dos locais das falhas passadas seja a chave para desvendar futuras ocorrências dos escorregamentos na região de estudo.

O primeiro passo dos autores, foi então classificar escorregamentos multitemporais, desde 1941 em diante, com base nos principais eventos observados. A classificação foi realizada essencialmente com base em fotografias aéreas. A informação coletada através da interpretação das fotografias aéreas, sobre os eventos, foi transferida para mapas topográficos de larga escala (1:10.000). Todos os mapas gerados, foram combinados, para montar um mapa de inventário multi-temporal dos escorregamentos. Os mapas foram sobrepostos e então mesclados. Os escorregamentos foram então classificados com relação à idade, em recentes, antigos ou muito antigos. Foram classificados também com relação à atividade, velocidade e profundidade, em geral utilizando parâmetros geomorfológicos.

Buscando montar um mapa de perigo de escorregamentos, por intermédio da análise histórica desses escorregamentos, geraram quatro classes de frequência dos eventos. Além da frequência, definiram a intensidade dos movimentos, considerando

como intensidade a medida de destrutividade do escorregamento, que foi definida como função do volume do material e da velocidade esperada (Tabela 4-2).

Tabela 4-2 - Intensidade do movimento de massa, agrupado em quatro classes, com base no volume estimado e na velocidade do movimento de massa.

Volume Estimado (m ³)	Velocidade de escorregamento esperada		
	Movimento de massa rápido (Queda de Blocos)	Movimento de Massa Intermediário (Fluxo de Detritos)	Movimento de Massa Lento (Deslizamento)
< 0.001	Leve (1)		
< 0.5	Médio (2)		
> 0.5	Rápido (3)		
< 500	Rápido (3)	Leve (1)	
500 - 10000	Rápido (3)	Médio (2)	Leve (1)
10000 - 50000	Muito Rápido (4)	Alto (3)	Médio (2)
> 500000		Muito Alto (4)	Alto (3)
>> 500000			Muito Alto (4)

FONTE: Adaptado de CARDINALI *et al.* (2002).

Após definirem as classes, cruzaram os valores de intensidade pela frequência dos eventos (Tabela 4-3) e assim, foi possível a montagem do mapa de perigo de escorregamentos (Figura 4-2).

Tabela 4-3 - Classes de perigo de movimento de massa, cruzando parâmetros de intensidade e frequência estimada.

Frequência Estimada de Escorregamentos	Intensidade do Escorregamento			
	Baixa (1)	Média (2)	Alta (3)	Muito Alta (4)
Baixa (1)	1 1	1 2	1 3	1 4
Média (2)	2 1	2 2	2 3	2 4
Alta (3)	3 1	3 2	3 3	3 4
Muito Alta (4)	4 1	4 2	4 3	4 4

FONTE: Adaptado de CARDINALI *et al.* (2002).

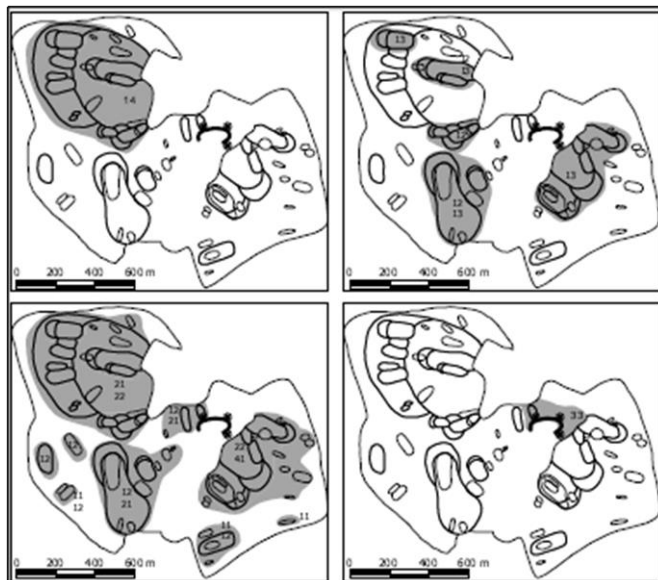


Figura 4-2 – Mapa de zonas de perigo de movimento de massa.

Fonte: CARDINALI *et al.* (2002).

4.4 A QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME

Tsutsui *et al.* (2007) introduzem uma técnica para rapidamente acessar áreas de escorregamentos de larga escala, que utilizam modelos digitais de elevação extraídos de imagens de satélite de alta resolução, apresentando três vantagens:

- a) MDEs de ampla cobertura e grande precisão podem ser gerados automaticamente e rapidamente;
- b) Movimentos de massa podem ser detectados por diferença na elevação de dois MDE gerados antes e depois dos eventos;
- c) O volume dos materiais erodidos e dos materiais acumulados pode ser estimado com base nas mudanças das elevações detectadas.

As mudanças na elevação da superfície foram extraídas das diferenças temporais de dois modelos digitais de elevação gerados com base em imagens de alta resolução SPOT-5 (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*), obtidas antes e depois dos movimentos de massa (Figura 4-3). Mudanças na elevação foram calculadas entre os dois MDEs, em intervalos de 5 metros. As principais áreas de escorregamentos foram confirmadas por análise de campo, interpretações de fotografias aéreas e por meio de mapa de variação na elevação baseado em fotogrametria aérea e LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

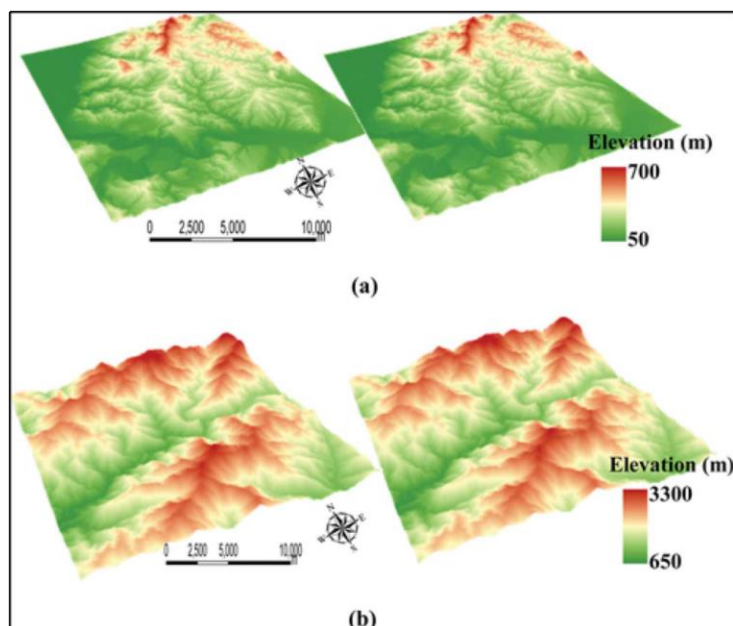


Figura 4-3 – MDEs baseados em imagens SPOT-5; à esquerda modelos de antes do evento e à direita modelos de depois do evento.

Fonte: Tsutsui *et al.* (2007).

Tsutsui *et al.* (2007), após a obtenção das áreas dos escorregamentos realizaram o cálculo da variação de profundidade para cada área, com base nas variações de declividade entre os MDE de antes e depois do evento. Do mesmo modo, após adquirir a área e a profundidade, foi calculado o volume de material que escorregou (Tabela 4-4).

Cabe ressaltar que o autor levou em consideração o erro estimado em cada um dos cálculos, que chegou a ser de $146 \times 10^3 \text{ m}^3$. Este erro é causado por alguns fatores, entre eles a precisão no cálculo da área para regiões mais elevadas, e partes sombreadas nas imagens, que impossibilitaram a estimativa dos cálculos de profundidade e a área.

Tsutsui *et al.* (2007) afirmam que há possibilidade de obter modelos quantitativos de área, profundidade e volume de escorregamentos, por meio de MDEs, sendo mais difícil a obtenção desses resultados por fotografia aérea ou fotogrametria, devido ao grande número de fotos necessários para cobrir a extensão dos eventos.

Porém, mostram que a utilização do método proposto possui algumas limitações. Com a utilização de MDE baseados em imagens SPOT, que possuem 2,5 m de resolução, a precisão na altitude representada pelo modelo foi de 10 m. Sendo

assim, o modelo é falho para escorregamentos de pequena e média escalas. A segunda falha do modelo é a detecção de muitos erros em declividades com ângulos de inclinação maiores do que 40° , sendo que a taxa de acerto no cálculo da área foi somente de 20-40%. O problema é se dá, provavelmente, ao processamento do MDE, devido a distorções na imagem.

Tabela 4-4 - Comparação do volume estimado de movimento de massa dos resultados obtidos, com volumes reais calculados por fotogrametria aérea e LIDAR.

Num.	Tipo de Evento	decl. Médio	Dir.	A. Nossos Resultados			B. Dados Reais			Erro (A - B)	
				Área (m ² ×10 ³)	Profundidade M. (m)	Volume (m ³ ×10 ³)	Área (m ² ×10 ³)	Profundidade M. (m)	Volume (m ³ ×10 ³)	Profundidade M. (m)	Volume (m ³ ×10 ³)
1	Escorregamento	32	-	8	-18.2	-139	5	-14.3	-74	-3.9	-6.5
2	Escorregamento	21	+	13	-15.4	-207	9	-14.9	-140	-0.4	-66
				4	+12.0	+45	14	+13.7	+197	-1.6	-151
3	Escorregamento	21	-	5	-12.7	-58	5	-12.6	-60	-0.1	+3
				5	+12.6	+60	15	+14.4	+218	-1.8	-159
4	Escorregamento	29	-	5	-13.8	-62	3	-11.9	-38	-1.9	-24
				4	+20.3	+82	4	+17.6	+71	+2.7	+10
5	Escorregamento	29	-	10	-18.0	-180	8	-15.9	-128	-2.0	-52
				10	+15.9	+153	12	+17.9	+219	-2.0	-67
6	Escorregamento	28	-	5	-14.2	-76	5	-15.7	-78	+1.5	+2
				5	+11.6	+61	2	+11.7	+23	-0.1	38
7	Escorregamento	25	-	24	-22.6	-532	24	-21.7	-521	-1.0	-11
				25	+19.1	+481	24	+23.6	-563	-4.6	-82
8	Escorregamento	25	-	56	-25.6	-1423	61	-24.4	-1494	-1.2	+71
				62	+21.2	+1305	78	+22.6	+1967	-1.4	-662
9	Escorregamento	30	-	4	-17.0	-66	4	-15.4	-58	-1.6	-8
10	Escorregamento	26	-	7	-14.1	-98	8	-15.6	-122	+1.5	+23
				8	+14.3	+117	14	+17.5	+249	-3.1	-132
11	Escorregamento	35	-	5	-16.4	-78	7	-16.4	-115	0.0	+37
				6	+15.5	+96	9	+17.1	+162	-1.5	-66
12	Escorregamento	41	-	6	-17.9	-106	6	-20.0	-123	+2.1	+18
				3	+19.5	+49	3	+20.0	+63	-0.5	-15
13	Escorregamento	22	-	7	-12.8	-86	8	-12.2	-96	-0.6	+10
				9	+21.5	+199	10	+19.6	+198	+1.9	+1
14	Escorregamento	27	-	6	-15.4	-96	3	-11.0	-33	-4.5	-63
				5	+13.7	+66	10	+15.3	+156	-1.5	-90
Total (RMSE)										2.1	146

FONTE: Adaptado de TSUTSUI *et al.* (2007).

Outros autores que seguem a mesma linha de estudo são Fiani *et al.* (2000), que tiveram como objetivo coletar informações sobre a forma atual da superfície que foi invadida por lama, a localização das pilhas instáveis que podem ser perigosas e o cálculo do volume de material mobilizado. Para isso, os autores utilizaram comparações entre os dados de antes e depois dos eventos. Para isto, utilizaram um mapa na escala 1:5000 produzido 25 anos antes do evento. Os dados foram então obtidos por cartografia na escala 1:5000, adquirido em formato digital e que posteriormente foi rasterizado, georreferenciado e depois convertido para dados numéricos, utilizando procedimentos automáticos de obtenção dos valores, conseguindo principalmente, as cotas altimétricas, para aplicação no modelo.

Os dados utilizados, relativos à situação pós-evento, são de uma atividade realizada em campo, com técnicas tradicionais. A porção intermediária da montanha, na qual a superfície é mais declivosa e irregular, foi analisada por meio de um medidor de distância eletrônico, denominado MDL (*Laser Distance Meter*), que disponibiliza uma resposta direta da superfície, que depois foi interpretada em laboratório.

Fiani *et al.* (2000), com base nos dados obtidos, produziram modelos digitais de elevação, de antes e após o evento, para calcular o volume de material e para isso, foram necessários parâmetros que envolvem algoritmos de interpolação e limites da área de interesse. Fora os dados cartográficos e de análises de campo, foram utilizadas técnicas fotogramétricas para a confecção de MDEs com base na correlação digital das imagens. Todos os dados adquiridos, foram então comparados, com o objetivo de individualizar a variação morfológica do terreno.

Os autores afirmam que com a análise dos modelos é possível observar claramente as zonas de erosão, correspondentes às áreas que serão afetadas pelos escorregamentos. Afirmam também que para o cálculo do volume, como estão envolvidos os algoritmos de interpolação e as condições de limite da área de interesse, se mantiver fixado o interpolador, o volume varia com a definição altimétrica do limite *boundary effect*. Uma vez que o algoritmo de interpolação esteja definido, juntamente com o intervalo das curvas de nível (ex. 5m), o mesmo deve ser utilizado para todos os MDEs, sendo possível adquirir os volumes.

Se comparados, os objetivos finais de ambos os trabalhos são o cálculo do volume com base em diferentes análises preliminares, porém com métodos comparativos a partir de dados históricos dos escorregamentos.

Assim como os trabalhos mencionados (FIANI *et al.*, 2000; TSUTSUI *et al.*, 2007), outro trabalho que visa o cálculo do volume de material é o de Marchesini *et al.* (2008), que utilizam dados já existentes da área dos escorregamentos, e criam *scripts* de computador para calcular as elevações e a direção dos movimentos, para em seguida aplicar em GIS e obter o volume. O que o diferencia dos dois modelos anteriores é o fato de este não utilizar dados de antes dos escorregamentos, ou seja, os autores não aplicam métodos comparativos, trabalhando somente com dados obtidos após o evento.

Após a representação dos modelos encontrados na literatura, que buscam a probabilidade de escorregamentos e também a quantificação do volume de material suscetível a escorregamentos, foi possível perceber que os métodos encontrados e que são aplicados, representam apenas técnicas qualitativas para a determinação do que foi proposto, não havendo muitas técnicas que representem os modelos quantitativos. Não é possível afirmar que não existem tais modelos quantitativos ou que não estejam sendo aplicados, porém são poucos e devido à dificuldade de utilizá-los devido a sua complexidade, quase não são apresentados.

Van Westen *et al.* (2005) afirmam que a maioria dos mapas de risco são de natureza qualitativa e concentram-se basicamente em determinar a suscetibilidade, que pode ser vista como uma indicação relativa da probabilidade espacial. Mostram ainda que, dos três fatores determinantes (perigo, vulnerabilidade e quantidade), o perigo é de longe o mais complexo de estabelecer. Ilustram diversos dos problemas associados em determinar a probabilidade temporal e espacial de ocorrência, o volume do movimento de massa esperado e os limites pelos quais o material irá se mover (Figura 4-4).

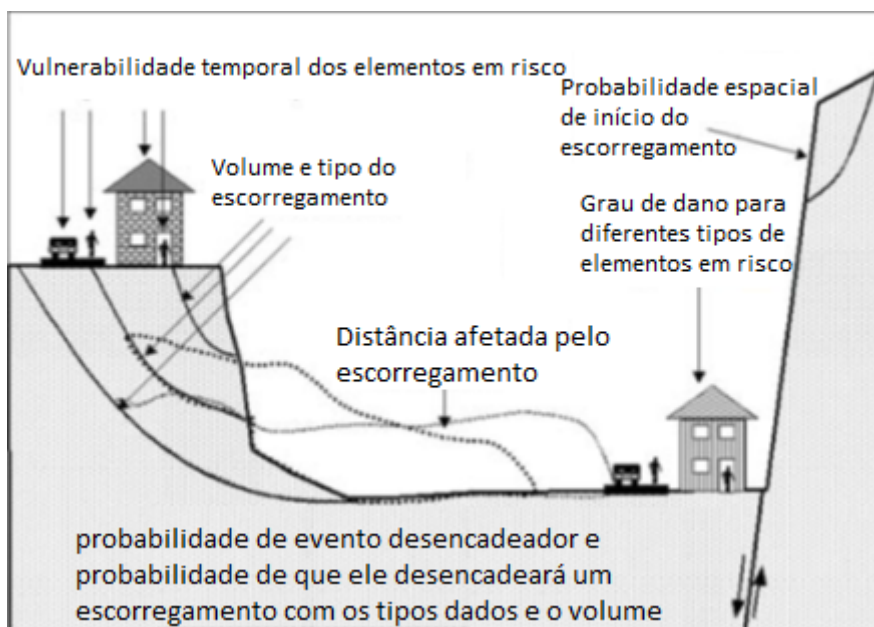


Figura 4-4 - Alguns dos aspectos mais problemáticos para a determinação do risco de escorregamento.

FONTE: Adaptado de VAN WESTEN *et al.* (2005).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Além do desafio de conseguir espacializar o método, há também a necessidade de validá-lo e por isso foi escolhida a bacia do Rio Jacareí como área de estudo, uma vez que os resultados encontrados podem ser comparados com as cicatrizes dos escorregamentos existentes.

Para a quantificação do volume de material suscetível a escorregamentos, é necessário realizar a modelagem do Fator de Segurança das encostas, bem como um modelo de probabilidade de escorregamentos e para ambos são necessárias várias etapas.

Para dar início ao trabalho, foi necessária uma base de dados bastante confiável – informações que representam os valores o mais próximos da realidade – da região de interesse. Quanto mais confiável este banco de dados, maior a precisão do modelo e seu resultado, logo, o desafio é a montagem e organização destas informações iniciais a respeito das características morfológicas, geológicas e pluviométricas referentes à região. O método baseia-se na utilização dos dados resultantes do Fator de Segurança para o cálculo da probabilidade – e posterior quantificação do volume – de ocorrerem escorregamentos, a partir dos parâmetros de coesão, ângulo de atrito, peso específico natural, inclinação da encosta e espessura do solo. Porém, para efeito de comparação, além do método baseado no Fator de Segurança, foi realizada também a modelagem cruzando informações das variáveis geomorfométricas (VG), através de retroanálise, com base nos escorregamentos de março de 2011.

5.1 ORGANIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS

Foi utilizada imagem de satélite *Worldview*, para a delimitação das cicatrizes dos escorregamentos, e também para delimitar as extensões e os trajetos do material que desprende das encostas. As bases vetoriais planialtimétricas foram adquiridas através de levantamento aerofotogramétrico, realizado pela MINEROPAR (Atual Serviço Geológico do Paraná) na escala 1:10.000 e os defeitos na base foram

corrigidos através do *software* ArcGis®, este também utilizado para a realização de toda a modelagem e confecção dos mapas.

Esta é uma base rica em detalhes, principalmente até a cota de 30 metros, em que o intervalo entre as curvas de nível é de 2,5 metros; acima dessa cota o intervalo é de 5 metros.

Grande parte desta base teve que passar por correções, para unir vetores, corrigir o sentido de fluxo de drenagens para a utilização na geração do MDE *Topo to Raster*, além dos valores das cotas hipsométricas e ajustes de pequenos deslocamentos dos vetores, devido a erros de coordenadas ou durante a digitalização da base. O objetivo foi melhorar a qualidade dos dados de saída, representando com a melhor precisão possível, as informações do relevo (Figura 5-1).

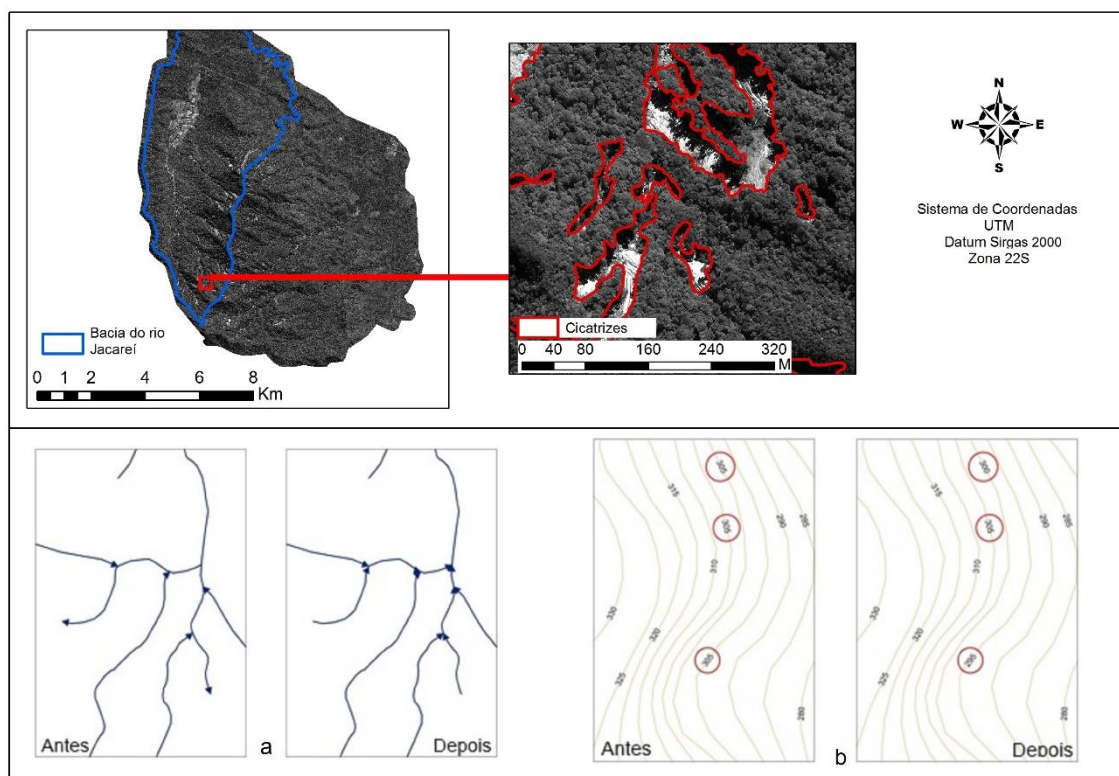


Figura 5-1 - Exemplo de correção dos atributos topográficos e contornos das cicatrizes dos escorregamentos. a- correção do sentido de fluxo das drenagens. b- correção das cotas hipsométricas.

FONTE: O autor (2015)

A base vetorial que representa os contornos das cicatrizes dos escorregamentos, datados de 11 de março de 2011, digitalizados com base na

imagem *Worldview*, foi fornecida pelo pessoal do Núcleo de Geoprocessamento da UFPR (SILVEIRA *et al.*, 2012). Essa base vetorial serve de auxílio para a validação do modelo preditivo e também para aferir o cálculo da probabilidade, através de retroanálise, ou seja, utilizando dados dos escorregamentos pretéritos, para o cálculo da probabilidade através das VGs.

5.2 MODELAGEM DO FATOR DE SEGURANÇA

Para o cálculo do volume, com base no Fator de Segurança, foram são necessários os seguintes procedimentos:

- a) Montagem da base planialtimétrica, como curvas de nível, pontos cotados, além da hidrografia, com sentido de fluxo corrigido.
- b) Confecção do MDE, a partir da base planialtimétrica.
- c) Análise digital do relevo, para caracterização da declividade, plano de curvatura, índice topográfico de umidade, e espessura.
- d) Caracterização dos tipos de Solo, a partir da análise realizada por Silveira (2010), que consiste na realização da álgebra dos mapas que representam a espacialização dos atributos topográficos.
- e) Confecção de mapas de coesão, ângulo de atrito e peso específico, com base no tipo de solo. Um dos objetivos nesta etapa, foi validar esses parâmetros com a coleta de amostras de solo e ensaios de cisalhamento direto em laboratório.
- f) Modelagem do Fator de Segurança, a partir do cruzamento dos mapas referentes aos parâmetros envolvidos (coesão, ângulo de atrito, etc.), utilizando proposta apresentada por Silveira *et al.* (2012).
- g) Cálculo da probabilidade de escorregamentos, a partir do desvio padrão do Fator de Segurança das encostas.
- h) Quantificação do volume de material suscetível a escorregamentos.

O método do Fator de Segurança baseia-se na análise do equilíbrio limite, empregando valores determinísticos das forças resistentes e mobilizantes para a sua determinação em uma encosta.

O volume de material movimentado durante um evento pode ser estimado a partir da probabilidade de escorregamento que, uma vez determinada, a extensão longitudinal dos taludes será proporcional, sendo assim, o volume será dado pelo produto da área da cunha instável de solo, pelo comprimento linear do sulco propenso ao desmoronamento estimado pela probabilidade (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

5.2.1 Método de obtenção do MDE

Após a correção das bases hipsométrica e hidrográfica, foi realizada a geração do MDE a partir do método *TopoToRaster*, que consiste na interpolação de uma superfície hidrologicamente correta, baseado no programa ANUDEM – Australian National University Digital Elevation Model - (HUTCHINSON e DOWLING, 1991), e através do método de krigagem, que é um método de interpolação determinístico, pois baseia-se nos valores medidos ao redor ou em fórmulas específicas, que determinam a suavização da superfície resultante (OLIVER, 1990).

Diferente da Krigagem, o método *TopotoRaster* interpola valores de elevação para um *Raster* enquanto impõe restrições que garantem uma estrutura de drenagens conectadas e a correta representação de sulcos e córregos, a partir de dados de contorno (HUTCHINSON e DOWLING, 1991).

Os dois interpoladores foram escolhidos, pois um utiliza apenas a variação hipsométrica, apresentando bons resultados na representação do relevo e na suavização das feições e o outro, além da variação hipsométrica, também leva em consideração as características hidrológicas que também são importantes agentes modeladores da superfície. Ambos foram comparados para que suas diferenças na interpolação do terreno fossem observadas.

Os dois modelos foram gerados com resolução espacial de 5 metros e 15 metros, uma vez que a base planialtimétrica e hidrológica utilizada estava sendo testada. Utilizando as duas resoluções espaciais, é possível verificar até que ponto a base apresenta melhores resultados. Se houvesse uma distinção maior dos objetos e das feições de relevo na base com resolução espacial de 5 metros, esta poderia ser utilizada para o restante do processamento, sendo descartado o MDE com 15 metros de resolução. As comparações entre as diferentes resoluções são realizadas a partir de uma mesma escala de trabalho. Os valores atribuídos para o tamanho dos pixels,

foi escolhido com base na escala de aquisição da base planialtimétrica, de 1:10.000. Utilizar resolução acima de 15 metros, resultaria em poucos detalhes e perda de informações e, abaixo de 5 metros a base planialtimétrica não possui tamanha distinção de detalhes.

5.2.2 Modelagem dos atributos topográficos

A partir do MDE, foram realizados os processamentos dos seguintes atributos topográficos: declividade, plano de curvatura e índice topográfico de umidade, que foram utilizados para atribuir valores ao mapa de solos, por meio da álgebra de mapas (DECLIV. + PC + ITU = TIPO DE SOLO). As classes estabelecidas para divisão dos valores, foram baseadas no trabalho de Silveira (2010), e também na classificação do EMBRAPA (2006), de forma que fosse mais fácil distinguir os tipos de solo pertencentes às determinadas classes.

O cálculo do atributo declividade foi estimado pela ferramenta *slope* contida no *software* ArcGis®, computado através do cálculo dos parâmetros para uma célula central e seus vizinhos mais próximos, utilizando uma matriz de dados 3x3 sobre o MDE. (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

A ferramenta calcula a taxa de mudança do valor de cada célula de acordo com seus vizinhos mais próximos, sabendo-se que a mudança na superfície, nas direções horizontal (dz/dx) e vertical (dz/dy) com base no centro da célula, determinam a declividade (Figura 5-2) (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

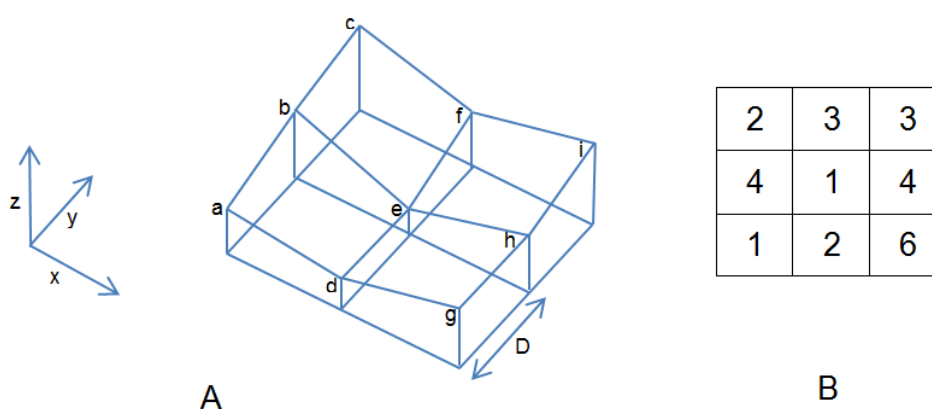


Figura 5-2 - a- Grade regular representando a superfície irregular do relevo, e os respectivos pontos com os valores de elevação. b- Janela representando os nove pixels.

FONTE: O autor (2015).

O algoritmo básico para o cálculo da declividade é (Equação 1):

$$\text{slope_radians} = \text{ATAN} \left(\sqrt{[\text{dz}/\text{dx}]^2 + [\text{dz}/\text{dy}]^2} \right) \quad (1)$$

Para o cálculo do plano de Curvatura, foi utilizado o mesmo processo, pela ferramenta *Curvature*, sendo realizada a derivação com base em uma matriz 3x3 que resultará no valor da célula central. O plano de curvatura é definido a partir dos valores das diferenças finitas nas direções x e y, acrescidos das segundas derivadas parciais, mostradas abaixo (Equações 2, 3 e 4) (MOORE *et al.*, 1993 *apud* SILVEIRA, 2010):

$$f_{xx} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{Z_4 + Z_6 - 2Z_5}{\lambda^2} \quad (2)$$

$$f_{yy} = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{Z_2 + Z_8 - 2Z_5}{\lambda^2} \quad (3)$$

$$f_{xy} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9}{4\lambda^2} \quad (4)$$

Por fim, o Índice Topográfico de Umidade (ITU) foi calculado da razão entre área de contribuição (A_c) e a tangente da declividade (β), mostrando que este índice é uma função da declividade somente, sujeito à restrição $0^\circ < \beta < 90^\circ$, de acordo com a Equação 5:

$$w = \ln \left(\frac{A_c}{\tan \beta} \right) \quad (5)$$

Quando a declividade é próxima de 0° , o limite tende ao infinito e quando é próximo de 90° , tende a 0, ou seja, quanto mais plano o relevo, maior é a umidade.

Os parâmetros topográficos plano de curvatura e declividade, foram modelados pelas rotinas contidas no *software* ArcGis®, que são rotinas criadas com base nos métodos descritos. Para o ITU, foi utilizada a ferramenta *raster calculator*, pois foi necessário reescrever a fórmula de forma que o programa pudesse utilizar os dados raster e assim atribuir valores para cada célula.

A fórmula é representada na Equação 6:

$$w = \ln \frac{(\text{flow_accumulation_raster})}{\tan(\text{declividade_raster})} \quad (6)$$

Para o cálculo do ITU, foi gerado modelo de acumulação de fluxo, pela rotina *Flow Accumulation*, utilizando o algoritmo D8. Este índice é, diferente da declividade e do plano de curvatura, um atributo topográfico secundário, gerado por intermédio de valores da direção de fluxo superficial, que por sua vez, pode ser considerado um atributo primário, gerado diretamente através do MDE. O ITU representa as áreas mais saturadas e menos saturadas, bem como as áreas mais ou menos drenadas, devido à contribuição do fluxo a montante. Por ser uma função da declividade, é considerado um atributo secundário. Para gerar a acumulação de fluxo, é necessário gerar um modelo de direção de fluxo, por isso foi necessário corrigir o sentido de fluxo da base vetorial referente à hidrografia e utilizar um modelo de representação com uma superfície hidrologicamente correta, como um *TopoToRaster*. A rotina *Flow Direction* gera um raster da direção do fluxo superficial do tipo *integer*, com base nos valores de elevação do MDE. Baseia-se no algoritmo D8, na qual o valor mais alto atribuído a uma célula, representa a declividade mais baixa comparado com os vizinhos mais próximos em uma janela 3x3, que será a célula que receberá o maior fluxo superficial. A Figura 5-3 representa os modelos de direção de fluxo e acumulação de fluxo D8.

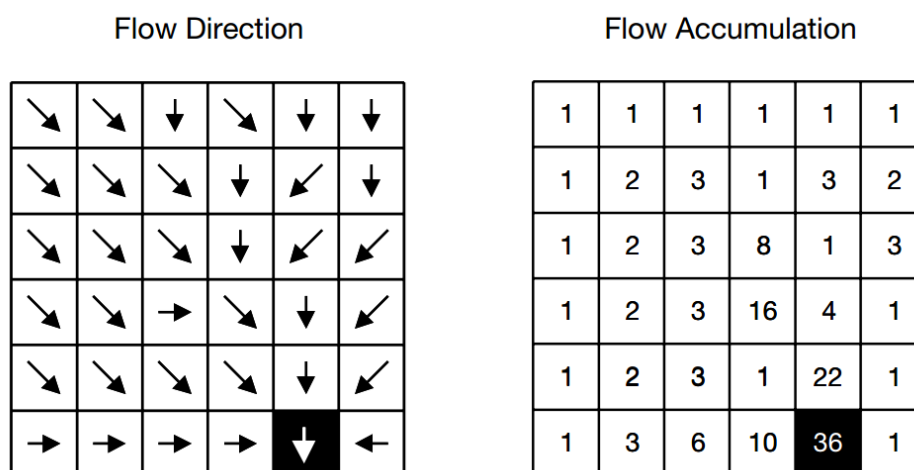


Figura 5-3 - Representação dos modelos de direção de fluxo e acumulação de fluxo D8.

Fonte: TRAUTH (2007).

5.2.2.1 Valores atribuídos a cada classe

Para a declividade, as classes foram divididas de 0 a 5 graus, representando relevo plano a suave ondulado, 5 a 15, representando um relevo ondulado, 15 a 30, sendo um relevo forte ondulado e maiores que 30 graus para um relevo montanhoso. As classes de declividade, segundo classificação do EMBRAPA (2006), apresentam mesmas designações, porém algumas diferenças nos intervalos, adaptados para o contexto da bacia do Jacareí, para serem representativos das classes de solo observadas, quando cruzadas com os outros parâmetros de relevo. A maior declividade observada na bacia, é 71°, o que mostra a ausência de relevo escarpado, considerado acima de 75° (EMBRAPA, 2006).

O plano de curvatura foi dividido em três classes, representando áreas de fluxo divergente, planar e convergente, com intervalos definidos em $< -0,01$, $-0,01 < X < 0,01$ e $> 0,01$, classes definidas através da rotina *curvature* para espacializar os três tipos de parâmetros representados.

Para o índice topográfico de umidade, foram adotadas duas classes, sendo divididas entre abaixo de 11 e acima de 11. Este valor foi adotado, comparando os resultados com imagens de satélite e análises de campo, nas quais foi observado que os locais que resultaram valores acima de 11 equivalem às áreas com maior acúmulo de umidade, maior saturação do solo e abaixo de 11 são áreas mais secas, mais drenadas. Como resultado da análise, foi possível observar uma área bastante úmida, que apresenta em mais da metade valores acima de 11. Pertencente à Serra do Mar paranaense, é uma região que segundo a classificação de **Koppen** apresenta temperatura alta durante a maior parte do ano e elevada pluviosidade

A terceira e última variável geomorfométrica utilizada para classificar os diferentes tipos de solo, foi a hipsometria, reclassificada nos intervalos de 0 a 20m, constituindo 28,53% da área total, 20 a 40m, com 11,05%, 40 a 400m que abrange 41,69% e acima de 400 metros, que representa os 18,72% restantes.

5.2.3 Caracterização do tipo de solo

A caracterização do tipo de solo na bacia do rio Jacareí foi realizada, devido a inviabilidade de aplicação de uma malha para a coleta de amostras indeformadas, que

seriam levadas para o laboratório a fim de determinar os valores dos parâmetros físicos do solo. Essa inviabilidade ocorreu devido à dificuldade de acesso para a coleta, por ser um terreno bastante acidentado e pelo tempo que seria necessário para a caracterização dos parâmetros físicos em ensaios de cisalhamento direto. Por esses motivos, foi necessário encontrar uma forma de caracterizar os parâmetros coesão, ângulo de atrito e peso específico natural do solo através de informações extraídas da bibliografia. Com as dificuldades, foram realizadas apenas três análises de cisalhamento direto, para validar os valores utilizados.

A definição das classes de solo foi realizada por meio de técnicas pedométricas, a partir da análise digital do relevo, com base na proposta apresentada por Silveira (2010) e com o auxílio do manual de classificação de solos (EMBRAPA, 2006).

A variável de declividade, plano de curvatura, índice topográfico de umidade e a hipsometria, foram utilizados para classificar os tipos de solo existentes na área da bacia. Para isso, as informações das quatro VG foram cruzadas (Figura 5-4).

Cada uma foi dividida em classes e para cada classe foi atribuído um valor numérico. As classes de declividade foram numeradas com quatro dígitos, as classes de hipsometria, com três dígitos, o plano de curvatura teve atribuídos dois dígitos e por último, o índice topográfico de umidade foi representado com um dígito. O objetivo foi tabular esses valores que representam cada classe, de forma que a soma seja um valor representativo das quatro classes, cada uma de seu respectivo modelo, para que esse valor final representasse uma classe determinada de solo, de acordo com os quatro parâmetros.

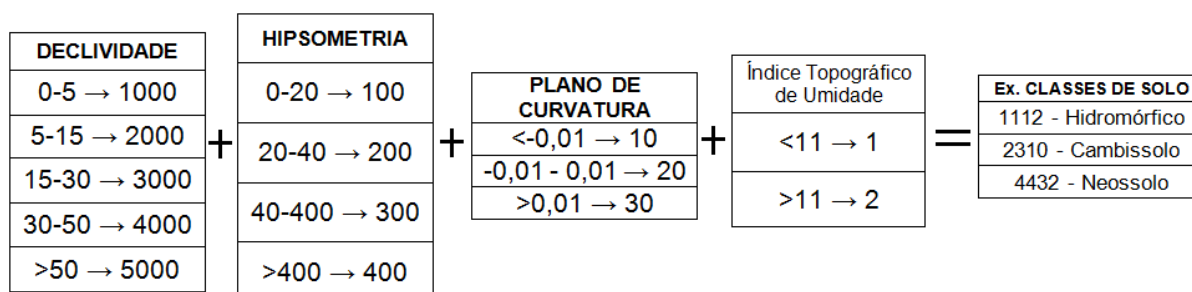


Figura 5-4 - Exemplo de caracterização do tipo de solo, a partir da modelagem digital do relevo.

FONTE: O autor (2015).

Uma vez baseada nos 4 parâmetros apresentados, a classificação acaba gerando muitos tipos de solos distintos, que não necessariamente são observados em campo. Após a comparação com a realidade da área de estudo, este modelo de solos gerado deve ser simplificado, de modo a representar somente as classes observadas. Essa simplificação foi realizada unindo as classes variadas de Cambissolos, as classes de Neossolos Litólicos e as classes que representam associações dos dois tipos de solos. Dessa forma, se houverem duas classes de Cambissolos, sendo elas Háplicos e Húmicos, estas são representadas como uma única classe, pois o excesso de detalhes do modelo extrapolaria o que é realmente observado em campo.

5.2.4 Modelagem do Fator de Segurança

Para o cálculo do Fator de Segurança, foi utilizado método do equilíbrio limite (FIORI e CARMIGNANI, 2009), no qual são levados em consideração a coesão do solo, peso específico, espessura da camada, saturação do solo, inclinação da vertente, o peso específico da água e a influência da vegetação.

Silveira *et al.* (2012) apresenta a análise do Fator de Segurança para a mesma bacia, utilizando a teoria do equilíbrio limite, além de utilizar o SIG como ferramenta para a modelagem e espacialização dos atributos necessários.

Durante o trabalho foi realizada uma nova modelagem empregando a análise do Fator de Segurança a partir de uma base atualizada e com melhor resolução, conforme novas observações de campo.

Esta modelagem emprega valores das forças resistentes e mobilizantes, e mostra que existe uma variância associada a essas forças. Devido a essa variância, a probabilidade é calculada através do desvio padrão do Fator de Segurança.

Foi adotado o plano de escorregamento posicionado abaixo do alcance das raízes, pois levantamentos de campo na área da Bacia do Jacaré mostraram que a vegetação também foi carregada pelos movimentos de massa. Além da influência da vegetação, é utilizada na equação a pressão exercida pelo vento sobre essa cobertura vegetal. Dessa forma, foi utilizada para o cálculo, a Equação 7 apresentada por Fiori e Carmignani (2009).

$$FS = \frac{Cs + \left[\left(\gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a \right) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \tan \varphi}{(h \gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}} \quad (7)$$

Onde:

FS = Fator de Segurança

Cs = Coesão do solo.

γ_{nat} = Peso específico natural.

h_w = Altura da zona de solo saturado, perpendicular à vertente.

h = Profundidade do solo, perpendicular à vertente.

γ_a = Peso específico da água.

i = Inclinação da vertente.

σ_a = Resistência devido ao atrito das raízes no plano de movimentação.

φ = Ângulo de atrito interno do solo.

σ_{ve} = Pressão exercida pelo vento sobre uma cobertura vegetal.

Kozciak (2005) realizou ensaios de cisalhamento direto em cada classe de solo, para determinar a variação nos parâmetros físicos, como coesão, ângulo de atrito, peso específico, e além disso determinou a variação de espessura dos horizontes de solo. Como área de estudo, utilizou a bacia do rio Marumbi, também no município de Morretes. Devido às semelhanças nas características físicas, esses valores foram extrapolados para calcular o Fator de Segurança, com base no mapa de solos gerado para a bacia do Rio Jacareí.

A partir da reclassificação do mapa de solos, foi possível atribuir valores para cinco classes distintas, entre elas os solos Hidromórficos, Argissolos, Cambissolos, Associações de Cambissolos e Neossolos, Associação de Neossolos e Afloramentos. O resultado da reclassificação é encontrado no capítulo seguinte.

Os valores utilizados para o atributo coesão, foram 10,9 kN/m² para os solos Hidromórficos, um valor esperado devido à saturação do solo. Para os Argissolos, foi utilizado valor de 13,5 kN/m², para Cambissolos, 14,8 kN/m² e 17 kN/m², para associações de Cambissolos com Neossolos e também para Neossolos e Afloramentos (KOZCIAK, 2005).

Para o Peso Específico, foram utilizados os valores de 18,4 kN/m³ nos Hidromórficos, 17,2 kN/m³ para os Argissolos, 17,8 kN/m³, sendo o valor para os Cambissolos e 17,3 kN/m³ para associações de Cambissolos e Neossolos e para Neossolos associados a afloramentos, o valor de 15,5 kN/m³ (KOZCIAK, 2005).

Os valores do Ângulo de atrito são diretamente proporcionais aos de coesão, ou seja, para coesão baixa, o ângulo de atrito também é baixo; para coesão alta, o ângulo de atrito é alto. A exceção ocorre com os solos hidromórficos, que devido à saturação, faz com que a coesão seja baixa e o ângulo de atrito alto, com o valor de 25,5°. O valor para os Argissolos é de 21,7° e para os Cambissolos e Neossolos associados aos Cambissolos, 23,2° e 23,5° respectivamente. Aos Neossolos associados a Afloramentos, foi utilizado um ângulo de atrito no valor de 23° (KOZCIAK, 2005).

A espessura dos horizontes de solo, segue basicamente o manual de solos do EMBRAPA (2006), com algumas alterações observadas em campo, sendo que associações de Neossolos e Afloramentos apresentam menor espessura e os solos Hidromórficos são mais espessos. A característica morfológica da área explica o fato, uma vez que os Neossolos situam-se nas partes mais elevadas e os solos Hidromórficos nas partes mais baixas, como a planície, que recebe todo o aporte de sedimentos. Os valores utilizados para a espessura são 50cm para os Neossolos associados a Afloramentos, 100cm para os Cambissolos e associações de Cambissolos com Neossolos, 150cm para os Argissolos e 200cm para os solos Hidromórficos (EMBRAPA, 2006). Esses valores utilizados foram validados durante a etapa de campo.

Todos os modelos espaciais foram transformados em *float*, para que a ferramenta *Raster Calculator*, na hora de realizar a álgebra de mapas, distribuísse resultados reais, com os respectivos valores decimais, sem que houvessem valores arredondados que gerassem erros amostrais.

Os parâmetros referentes à influência da vegetação e do vento, foram extraídos da bibliografia e feita uma média dos valores encontrados, com base nas características da região da Serra do Mar. Para a influência do vento foi utilizado o valor da ordem de 1,0 kPa (FENDRICH e FERREIRA, 1995) e para a influência das raízes, foi utilizado o valor da ordem de 5,0 kPa (WU *et al.*, 1979).

O valor referente à saturação do solo, determinado por (hw/h), foi considerado como 1, representando as piores condições, que seriam de um solo 100% saturado.

Mesmo com grandes semelhanças físicas, para validar os valores determinados por Kozciak (2005), foram realizados 3 ensaios de cisalhamento direto - CESEC, Universidade Federal do Paraná - sendo que a amostragem foi realizada próxima à vertente do Rio Tingidor, uma subbacia do rio Jacareí.

Para o cálculo do Fator de Segurança, foi utilizada a ferramenta *raster calculator*, que possibilita calcular equações aplicadas a *grids* espacializadas, gerando como resultados mapas, em que cada pixel representa o resultado de uma equação.

A equação utilizada, foi traduzida para a linguagem aceita na ferramenta, como mostra a Equação 8.

$$\begin{aligned} & ((\text{"cs_x10_float"} / 10) + (((((\text{"gnat1000float"} / 100) - 10) * \\ & (\text{"esp_x100float"} / 100) * (\text{Cos}(\text{"slpe_s69_5m"} * (\text{math.pi} / 180.0)))) + \\ & (5 * \text{Cos}(\text{"slpe_s69_5m"} * (\text{math.pi} / 180.0)))) * \text{Tan}(\text{"phix10_float"} / \\ & 10 * (\text{math.pi} / 180.0)))) / (((((\text{"esp_x100float"} / 100) * (\text{"gnat1000float"} \\ & / 100)) + 5) * \text{Sin}(\text{"slpe_s69_5m"} * (\text{math.pi} / 180.0))) + 1) \end{aligned} \quad (8)$$

5.2.4.1 O ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é uma técnica desenvolvida para determinar a resistência ao corte de um corpo de prova de solo de pequena espessura, representando uma situação real. Mede-se a resistência horizontal, em função da deformação vertical, em uma amostra colocada em uma célula de cisalhamento (Figura 5-5). O objetivo é, por meio da interpretação de uma envoltória linear, extrair os valores de ângulo de atrito interno do solo e do intercepto coesivo.

Os valores utilizados para os parâmetros físicos, uma vez que foram adquiridos a partir dos resultados da bacia do Marumbi, apresentados por Kozciak (2005), foram validados por ensaios de cisalhamento direto onde três amostras foram coletadas na bacia do rio Jacareí.

Cada amostra foi retirada de lugares com características distintas, sendo uma de solo residual e duas de solos coluvionares, além de estarem divididas entre os terços inferior, médio e superior da vertente do rio Tingidor. Os ensaios serviram de apoio para a validação dos parâmetros físicos, porém devido à dificuldade de coleta, não foram retiradas amostras suficientes para realização de duplicatas.



Figura 5-5 - Equipamento utilizado para ensaio de cisalhamento direto: a - célula de cisalhamento, b - Marcadores de tensão cisalhante e deformação vertical, c - sistema de transmissão de carga.

FONTE: O autor (2015).

De cada amostra foram tirados três corpos de prova, utilizando um molde quadrado de aproximadamente 10x10x2 cm. Cada corpo de prova foi colocado no equipamento para ensaio de cisalhamento, sendo que para a amostra da base da vertente do rio Tingidor, as tensões confinantes utilizadas foram 50kPa, 100kPa e 200kPa, enquanto que para as outras duas amostras, do meio e do topo da vertente, foram utilizadas tensões de 40kPa, 80kPa e 160kPa. Foram utilizadas ambas as tensões para efeito de teste.

5.3 MODELAGEM DIGITAL DA PROBABILIDADE DE ESCORREGAMENTOS

Para calcular a probabilidade de escorregamentos, foram utilizados dois métodos diferentes.

O primeiro método, apresentado por Fiori e Carmignani (2009), consiste no seguinte método:

- a) Baseia-se na teoria do Equilíbrio-Limite, onde exercem influência os valores determinísticos das Forças Resistentes (R) e Mobilizantes (M),
- b) A estimativa destas forças mostra que, na realidade há uma variância associada a elas. Com isso, para condições desfavoráveis, a ruptura pode ocorrer mesmo que o FS seja maior que a unidade,

- c) Se definida uma Margem de Segurança (Ms) como: $Ms = (R - M)$, esta margem de segurança terá uma variação aleatória e uma distribuição de probabilidade, Nesse caso, $Pr = P(Ms < 0)$, como é mostrado na (Figura 5-6),

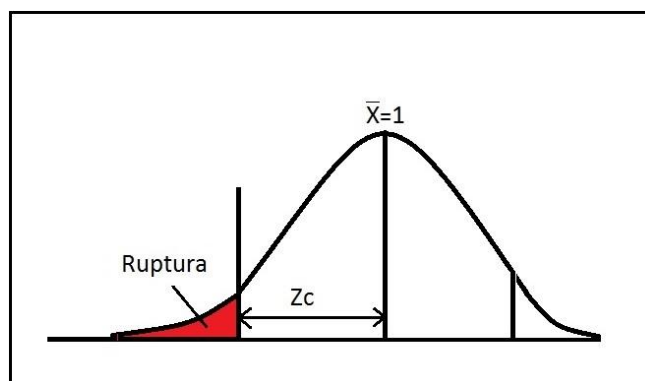


Figura 5-6 – Curva Normal Reduzida. A área em vermelho representa a probabilidade de que a margem de segurança seja menor do que 0, em condições de ruptura.

FONTE: O autor (2015).

- d) A medida adequada dessa distribuição é dada pelo número de desvios-padrão da média de Ms para a ruptura, expresso como Z_c (Coeficiente de confiança),
- e) O FS também é função de um número de variáveis aleatórias, então considera-se que a distribuição de probabilidade de F aproxima-se de uma distribuição normal,
- f) Nesse caso, a distribuição de probabilidade do FS e da MS será similar.

O coeficiente de segurança Z_c , pode ser determinado por (Equação 9):

$$Z_c = \frac{(F-1)}{\sigma_F} \quad (9)$$

Onde:

F = Fator de Segurança;

σ_F = Desvio Padrão do Fator de Segurança.

A fórmula, adaptada para o cálculo do Fator de Segurança, é baseada na fórmula estatística apresentada na Equação 10.

$$z = \frac{(X - \bar{X})}{\sigma} \quad (10)$$

Onde:

\bar{X} = Média do Valor X ;

σ = Desvio Padrão.

Após determinado o desvio padrão do Fator de Segurança a partir da variação dos valores representados no modelo espacial, foi possível calcular o coeficiente de segurança Z_c , e da mesma forma espacializar os valores determinados, aplicando a fórmula na ferramenta *Raster Calculator*.

Tendo um modelo espacializado de Z_c , para determinar a probabilidade, é necessário aplicar o valor de cada célula em uma tabela de distribuição normal, que representa a área subentendida pela curva normal reduzida, equivalente ao valor de Z_c (SPIEGEL, 1977). Essa área, subtraída da área total da curva, representa a probabilidade de escorregamento (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

Para compreender melhor o modelo do coeficiente de segurança, as ideias foram divididas da seguinte forma:

- a) A probabilidade é dada pelo valor da área da curva normal que encontra-se à esquerda da abcissa, ou seja abaixo do zero da ordenada, representada na Figura 5-6;
- b) O Z_c é representado pela área entre a média da curva normal (X) e o zero. O valor é determinado através da tabela de distribuição normal (Tabela 5-1);
- c) Juntas, as áreas equivalem a 50% da área total representada pela curva.

Para calcular a probabilidade subtrai-se o valor de Z_c determinado na tabela de distribuição, de 50% da área total.

Tabela 5-1 - Probabilidade determinada com base nos valores de Z_c aplicados à tabela de distribuição normal.

Probabilidade	Área subentendida pela curva normal reduzida	Z_c
50%	0 - 0,0250	0 - 0,06
45%	0,0250 - 0,0714	0,07 - 0,18
40%	0,0754 - 0,1217	0,19 - 0,31
35%	0,1255 - 0,1736	0,32 - 0,45
30%	0,1772 - 0,2224	0,46 - 0,59
25%	0,2258 - 0,2734	0,60 - 0,75
20%	0,2764 - 0,3238	0,76 - 0,93
15%	0,3264 - 0,3749	0,94 - 1,15
10%	0,3770 - 0,4236	1,16 - 1,43
5%	0,4251 - 0,4750	1,44 - 1,96
0%	0,4756 - Máx.	1,97 - Máx.

FONTE: O autor (2015)

A Tabela 5-1 é uma simplificação da tabela de distribuição normal de Spiegel (1977), na qual foram atribuídos intervalos de 5 em 5%, para facilitar a representação em um modelo espacial.

Como trata-se de uma modelagem com base no Fator de Segurança, a média utilizada para a curva normal foi um, sendo que valores maiores representam encostas estáveis e valores abaixo representam as encostas suscetíveis a escorregamentos.

5.4 MODELAGEM COM BASE NAS VARIÁVEIS GEOMORFOMÉTRICAS (VG)

O segundo método utilizado para calcular a probabilidade, foi realizado com o objetivo de comparar os resultados, uma vez que a modelagem do Fator de Segurança baseia-se essencialmente nos parâmetros físicos do solo - adquiridos através da análise dos ensaios de cisalhamento realizados e dados apresentados por Kozciak (2005) -, foi feito o cálculo da probabilidade de ocorrência dos escorregamentos de 11 de março de 2011, cruzando diretamente as variáveis geomorfométricas hipsometria, plano de curvatura e declividade. Para isso, a etapa do trabalho consistiu nos seguintes procedimentos:

- a) Utilização da base planialtimétrica para representação das variáveis geomorfométricas, a partir do MDE
- b) Atribuição de intervalos de classes para cada variável e cruzamento das informações (álgebra de mapas);
- c) Cálculo da probabilidade de ocorrerem escorregamentos, com base nos atributos de relevo e nas análises das cicatrizes dos escorregamentos pretéritos.

Para calcular a probabilidade de escorregamento em cada área delimitada pelas cicatrizes da bacia do rio Jacareí, foram utilizadas as mesmas variáveis geomorfométricas que serviram de base para classificar o tipo de solo, que são a hipsometria, o plano de curvatura e a declividade. Para cada VG, foram atribuídos intervalos de classes, cruzando a frequência de cicatrizes de escorregamentos com os valores de cada VG, como mostra a Figura 5-7.

Após atribuídos os intervalos de classes para cada variável geomorfométrica, de acordo com a frequência de cicatrizes, foi calculado o potencial de escorregamento (PE) em cada classe, a partir do método de probabilidade geométrica simples, utilizando para isso, a Equação 11:

$$PE = \frac{(\text{Área da Classe da VG}) \cap (\text{Área das Cicatrizes})}{\text{Área da Classe da VG}} \times 100 \quad (11)$$

Após calculado o PE das cicatrizes, em cada intervalo de classe das VG, foi realizado o procedimento de álgebra de mapas, somando o PE referente à hipsometria, à declividade e ao plano de curvatura e dividindo pela quantidade de VG, no caso três. A média encontrada representa a probabilidade de escorregamento na respectiva cicatriz.

A probabilidade de escorregamentos foi realizada de duas formas diferentes, a primeira que baseia-se no Fator de Segurança é um modelo preditivo, já a segunda, calculada através da análise das VG não é preditivo e sim o resultado probabilístico do evento de 11 de março.

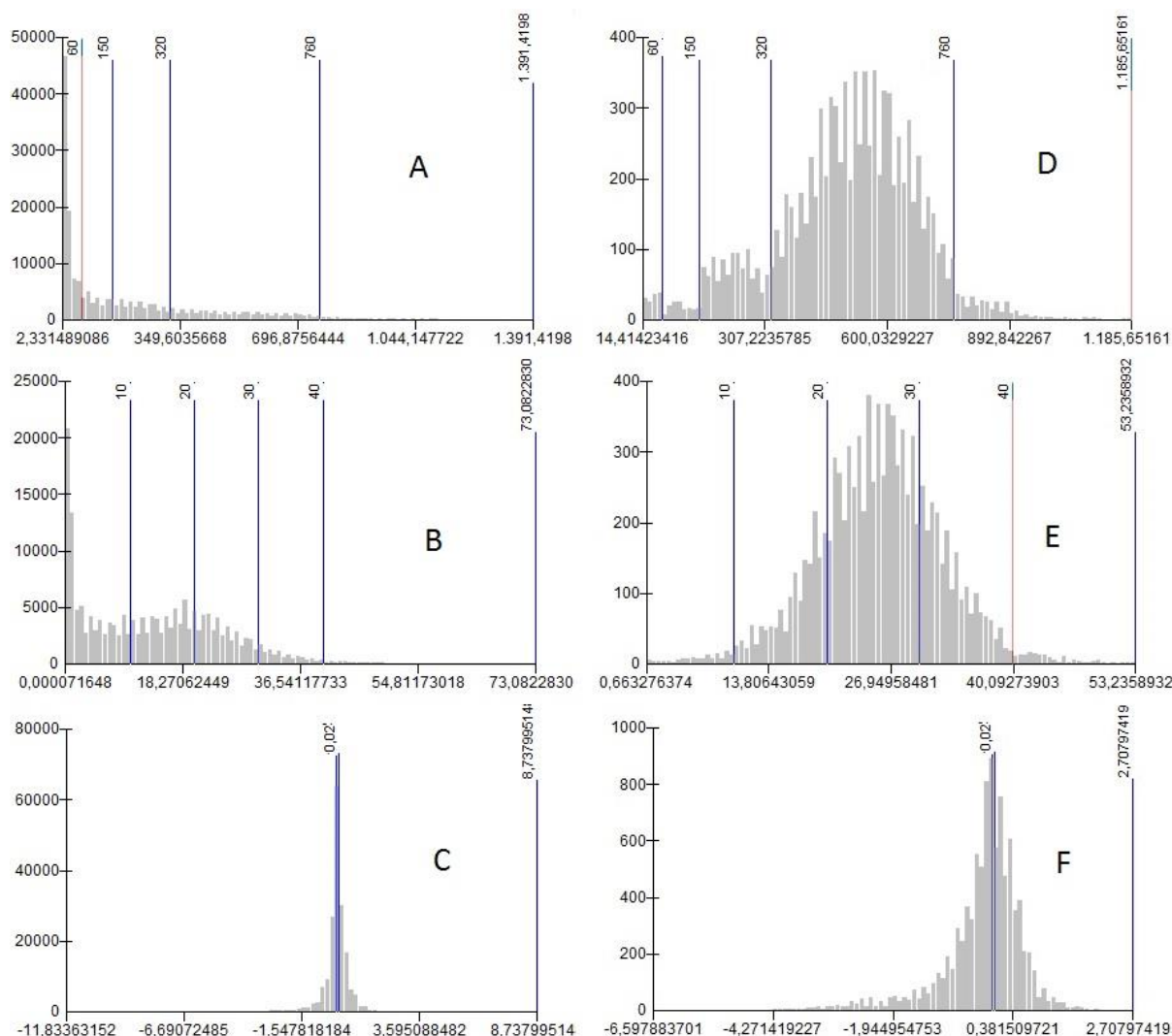


Figura 5-7 – Histogramas de frequência. A, B e C: frequências de hipsometria, declividade e plano de curvatura respectivamente, na bacia do rio Jacaréí; D, E e F: histogramas de frequência das cicatrizes, divididas nas classes das variáveis hipsometria, declividade e plano de curvatura respectivamente. FONTE: O autor (2015).

5.5 QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME

O volume de material suscetível a escorregamentos foi calculado a partir dos valores de probabilidade encontrados através do método da variância do Fator de Segurança. O método de probabilidade baseado nas VG foi desenvolvido para este trabalho, apenas para comparação dos resultados probabilísticos.

O volume de solo desmoronado será dado pelo produto da área da cunha instável de solo, pelo comprimento linear do sulco propenso ao desmoronamento,

estimado pela probabilidade, como mostra a Equação 12 (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

$$Vd = Ac \times D \times Pr \quad (12)$$

Onde:

Vd = Volume de solo desmoronado

Ac = Área da cunha instável de solo

D = Comprimento linear do sulco propenso ao escorregamento

Pr = Probabilidade de movimentação

O cálculo do volume foi realizado através do modelo preditivo, ou seja, não foram levadas em consideração somente as áreas dos escorregamentos anteriores e sim todas as cunhas da bacia, que foram delimitadas por valores iguais de probabilidade.

A área foi determinada da seguinte forma: primeiro foram formadas cunhas de escorregamentos de acordo com células de iguais valores de probabilidade. Sabendo que cada célula possui 25m² de área, foram multiplicadas a quantidade de células de cada cunha, por 25m².

Tendo a área de cada cunha, foi calculado o comprimento linear em cada uma e para isso, foram traçadas retas que vão do topo até a base da cunha, acompanhando a direção de fluxo. O produto do comprimento da reta, com a área calculada e com a probabilidade, resulta no volume de material suscetível a escorregamentos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 O MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

A hidrografia, com o sentido de fluxo superficial corrigido, permitiu a geração de um MDE que mostrasse além da elevação, a correta representação dos sulcos e córregos. Com isso, utilizar o MDE gerado a partir da ferramenta *TopotoRaster* gerou resultados melhores, quando comparado com o MDE gerado através da *krigagem*, que apresentou deformações principalmente nas regiões côncavas, nas quais encontra-se o fluxo das drenagens. Além disso, a ferramenta *TopotoRaster* mostrou um relevo mais suavizado, uma vez que a *krigagem* mostrou um modelo com uma superfície falha, imperfeita (Figura 6-1).

A qualidade da base planialtimétrica possibilitou a geração de um MDE com células de 5 metros, que mostrou bons resultados, quando comparado com o MDE de 15 metros, de menor detalhe. Isso foi um ponto positivo na qualidade, na suavização do relevo representado pelo modelo, pois com a base adquirida, foi possível discriminar feições de maior detalhes, aumentando a acurácia nos resultados e sendo assim, as medidas de área e distância são mais exatas.

Contudo, ao mesmo tempo que os resultados foram de melhor discriminação nos detalhes, o modelo atribuiu feições inexistentes entre os intervalos de elevações do MDE, o que representou um ponto negativo e com isso o modelo com células de 15 metros foi utilizado, mesmo apresentando menos detalhes, porém mais próximos da realidade.

O MDE apresentou uma variação na elevação de 1400 metros, sendo que a maior parte do terreno apresenta baixa altitude, com o valor de elevação médio de 197 metros. 28,53% dos valores de elevação, encontram-se entre 0 e 20 metros, 11,06% são valores entre 20 e 40 metros, já entre 40 e 80 metros, há apenas 9,13% da área total e 15,64% são altitudes entre 80 e 200 metros. O restante, é uma área com 16,92% e 18,72% que respectivamente apresentam elevações de 200 a 400 metros e maiores de 400, até aproximadamente 1400 metros.

Esses resultados mostram que é uma bacia hidrográfica com grande parte do relevo constituindo uma área de planície, mas que também apresenta áreas de um

relevo montanhoso. O mapa hipsométrico mostrou as menores altitudes na porção Norte da bacia, e as maiores elevações nas porções Sul e Sudeste.

Sobrepondo a imagem *Worldview* ao MDE e utilizando o *software* ArcScene®, foi possível notar o excelente resultado obtido pelo MDE, que com exagero vertical de 0,5, representou bem as feições do relevo na bacia do Jacareí (Figura 6-2).

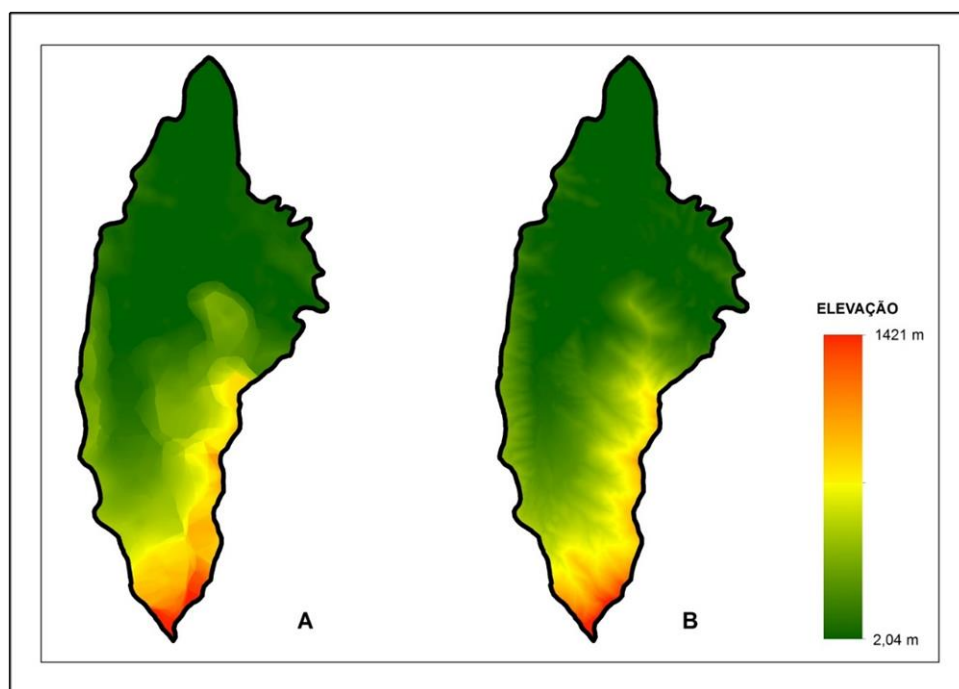


Figura 6-1 - MDEs gerados através de duas técnicas distintas: a- *Kriging* e b- *TopoRaster*.
FONTE: O autor (2015).

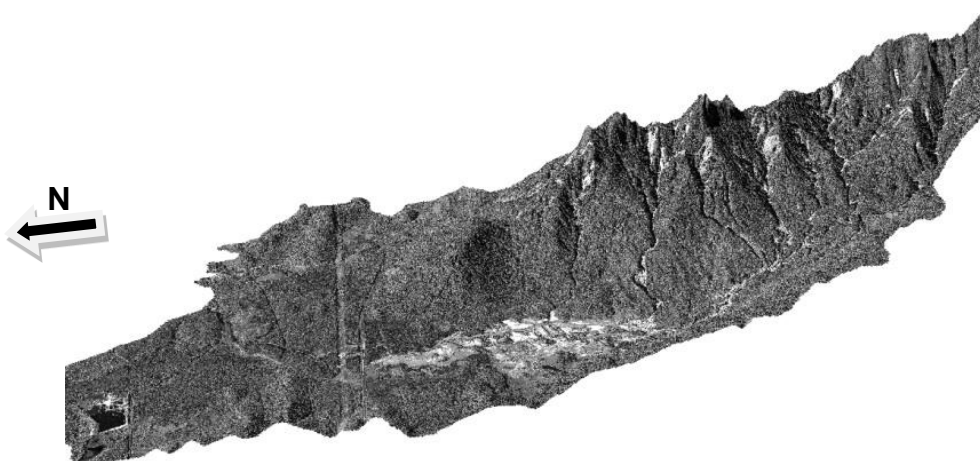


Figura 6-2 - Imagem *Worldview* sobreposta ao MDE. Exagero vertical = 0,5.
FONTE: O autor (2015).

6.2 MAPA DE SOLOS

6.2.1 Análise do solo com base nos atributos de relevo

A análise do plano de curvatura permitiu avaliar a distribuição do solo de acordo com a quantidade de água distribuída ao longo da vertente, conciliando os processos pedológicos com os hidrológicos. O modelo de declividade permitiu distinguir a grande e abrupta variação do relevo e como consequência, a variação nos tipos de solos caracterizados, bem como a espessura média baseada no acúmulo de sedimentos. Verifica-se baixa declividade próximo da área mais plana, gerando maior acúmulo de sedimentos; já os topos de morros mais íngremes, chegaram a apresentar até 70° de inclinação e consequentemente solos mais rasos, por não gerar tanto acúmulo.

A análise do ITU permitiu caracterizar as áreas com maior acúmulo de umidade, que de acordo com o mapa equivalem às áreas com maior acúmulo de sedimentos e como consequência, maior espessura na camada de solo. Essa área representa as planícies da bacia do rio Jacareí, que receberam todo o material movimentado. Com isso foi possível observar que a maior parte da área, na qual ocorreram as movimentações, não caracteriza elevada saturação, mas que recebeu fortes chuvas e elevada erosão superficial. Os pontos que apresentam altas declividades e elevado índice de umidade, são áreas nas quais houve tempo para o solo absorver parte da água superficial. A Figura 6-3 mostra o resultado da espacialização dos modelos de relevo, bem como as reclassificações dos intervalos de classes, necessários para gerar o mapa de solos.

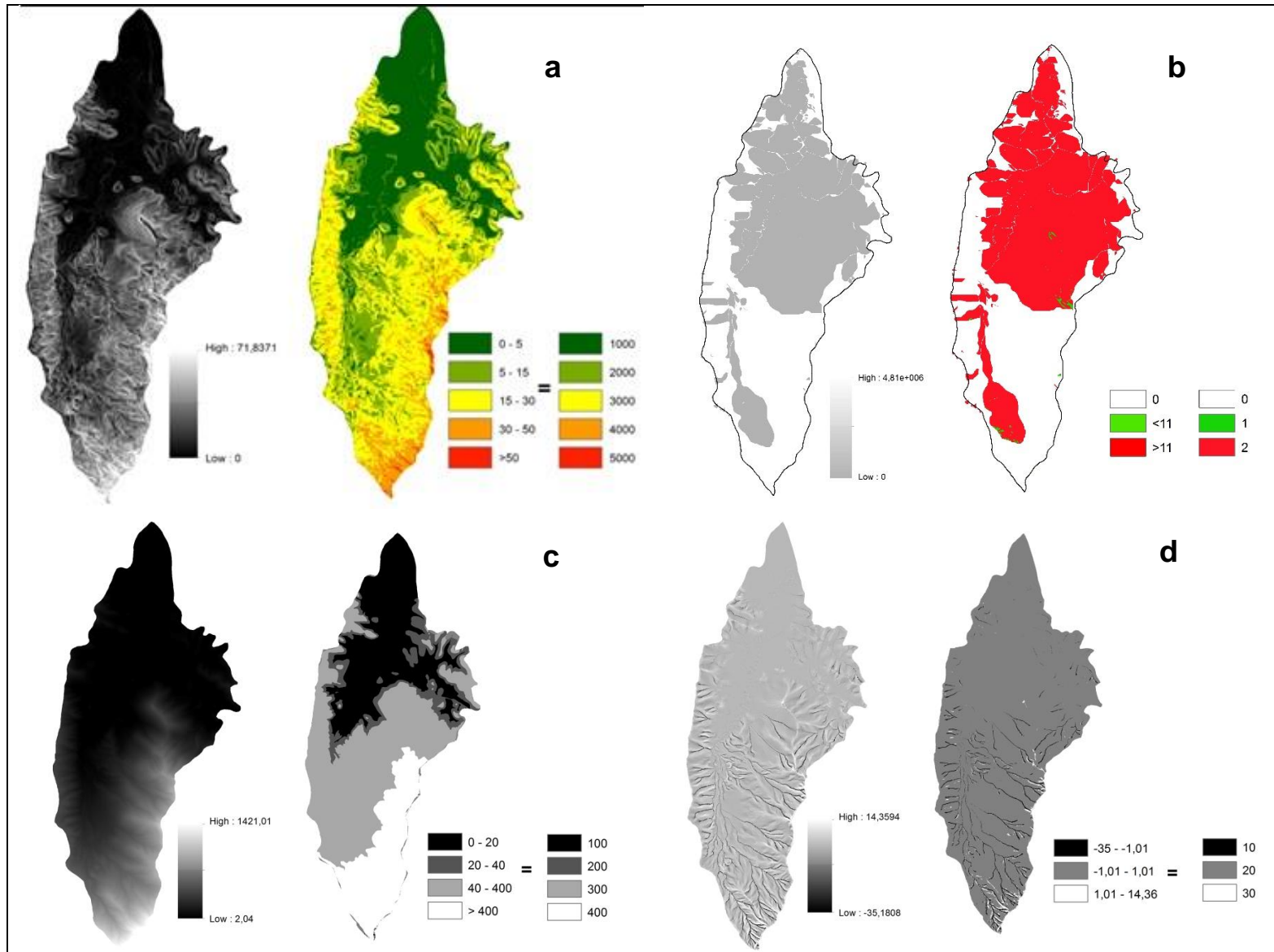


Figura 6-3 - Modelos de relevo. À esquerda na legenda, os intervalos de classe e à direita, as reclassificações para gerar o mapa de solos. a- Classes de declividade; b- Classes de ITU; c- Classes de hipsometria; d- Classes de plano de Curvatura (FONTE: O autor, 2015).

Utilizando a álgebra de mapas, os modelos de declividade, ITU, hipsometria e plano de curvatura foram cruzados, constituindo as 11 classes de solo apresentadas na Figura 6-4.

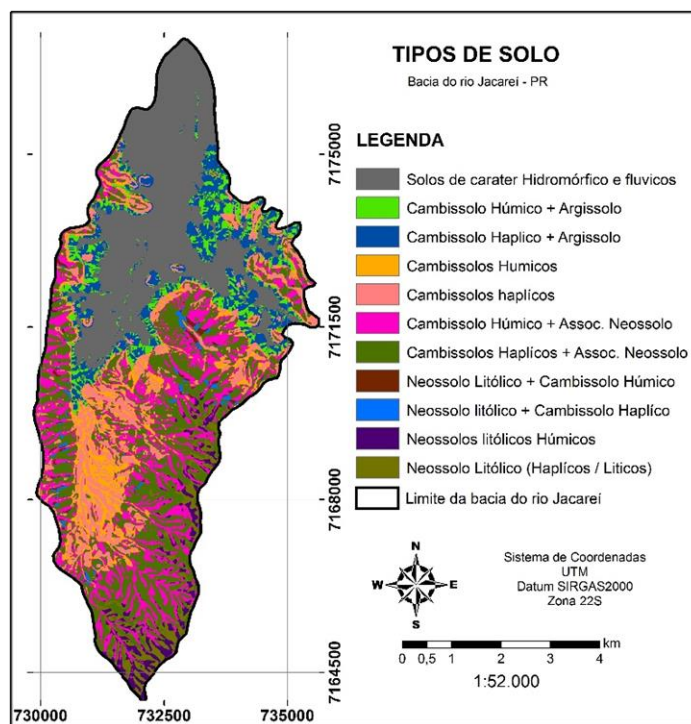


Figura 6-4 - Classes de solo, definidas a partir dos valores de hipsometria, plano de curvatura, índice topográfico de umidade e declividade.

FONTE: O autor (2015).

Classificados os tipos de solo, a etapa seguinte foi a validação em campo. O resultado foi que apenas 5 das 11 classes puderam ser observadas e com isso, o modelo foi simplificado para conter apenas as observadas.

Esta redução nas classes de solos pode ser explicada pela dificuldade de acesso em muitas áreas na bacia do rio Jacareí, o que significa que não foram observados alguns horizontes de solos, porém não significa que não existam ou não possam ser classificadas de acordo com o modelo. O mapa simplificado é apresentado na Figura 6-5.

É possível observar a maior porcentagem de Associações de Cambissolos e Neossolos, totalizando 41,29% da área, além de 17,43% de Cambissolos, 12,45% apenas de Argissolos, que foram considerados uma área de transição dos Cambissolos para os solos de caráter hidromórfico, 3,16% de uma associação de Neossolos com Afloramentos Rochosos, na parte mais elevada e declivosa da bacia

e um quarto correspondente à formação de Solos Hidromórficos, na porção mais plana, totalizando 25,67%.

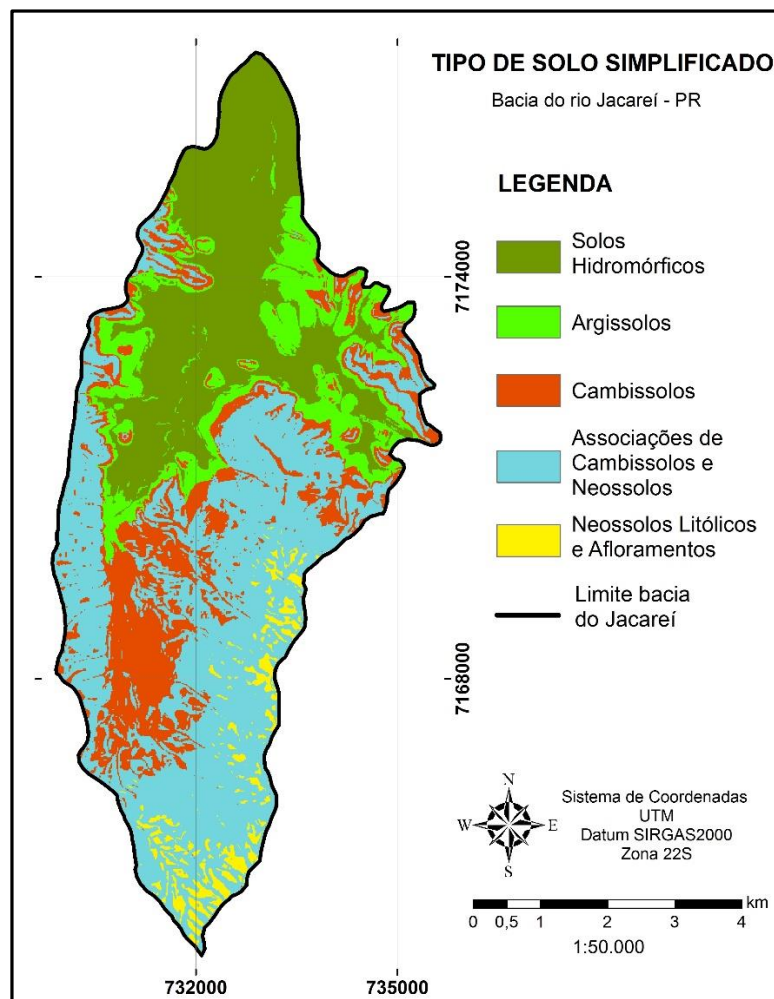


Figura 6-5 - Mapa de solos definido com as cinco classes observadas em campo e com auxílio de imagem *Worldview-1*.

FONTE: O autor (2015).

Kozciak (2005) conseguiu separar os solos da bacia do rio Marumbi em sete classes distintas, sendo cinco delas referentes a variações de solos cambissolos, classes também observadas na bacia do rio Jacareí, porém com associações distintas e menos discriminadas.

6.3 MODELAGEM DO FATOR DE SEGURANÇA

A partir do mapa com as cinco classes de solo definidas para a bacia do Jacareí, foram então gerados os modelos por reclassificação, dos parâmetros

envolvidos na modelagem do Fator de Segurança. O resultado da reclassificação e espacialização dos atributos coesão, ângulo de atrito, peso específico natural e espessura do solo, estão representados na Figura 6-6.

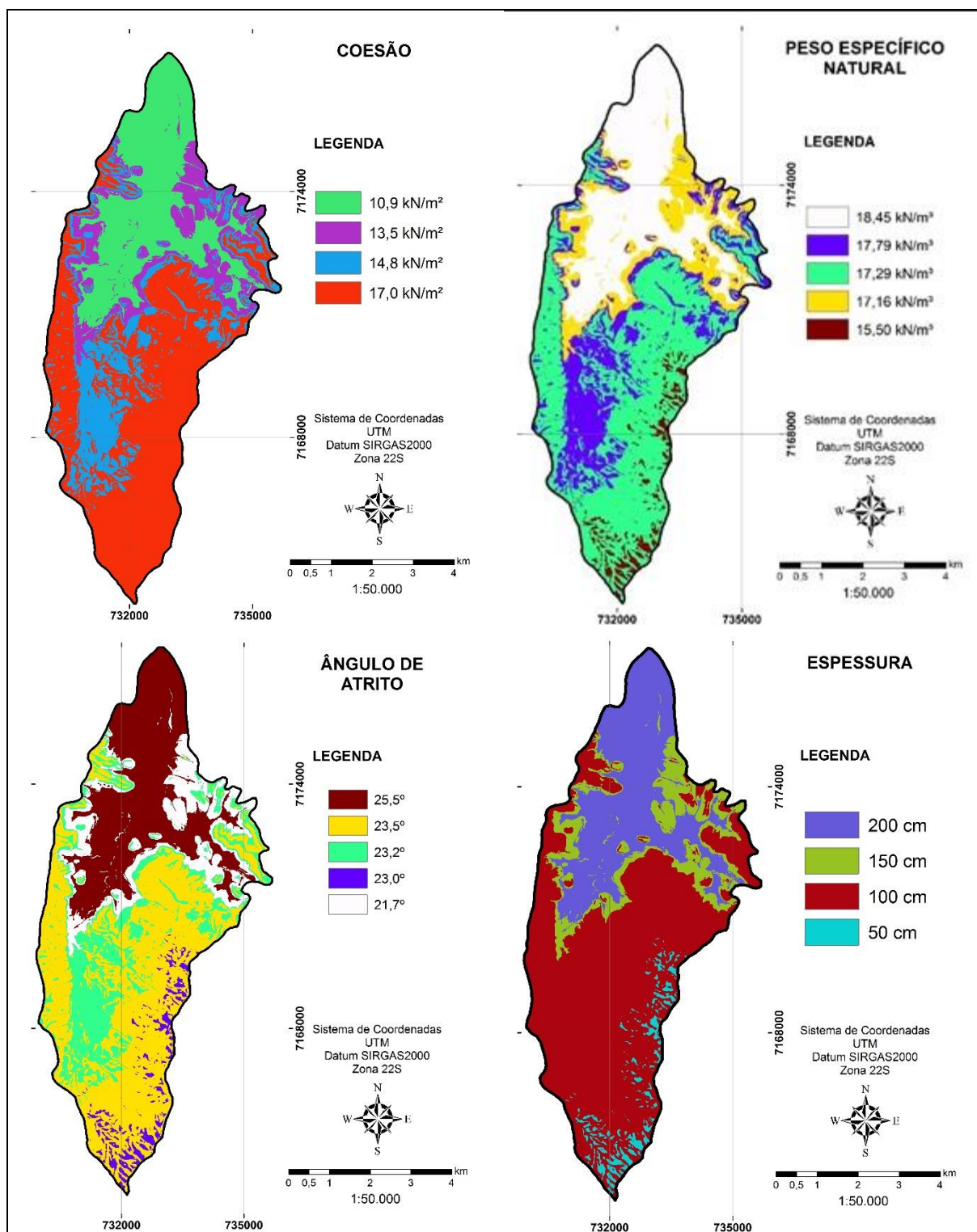


Figura 6-6 - Modelos espaciais dos parâmetros físicos referentes às classes de solos da bacia do rio Jacareí.

FONTE: O autor (2015).

O parâmetro coesão apresentou o mesmo valor em dois horizontes de solos diferentes, como mostra a Figura 6-6a; as associações de Cambissolos com Neossolos e associações de Neossolos com afloramentos apresentaram o valor de 17 kN/m³. Assim como a Coesão, o atributo Espessura também teve dois horizontes com valores iguais, representados por Cambissolos e associações de Cambissolos com Neossolos, ambos possuem aproximadamente 100cm de espessura.

6.3.1 Ensaios de cisalhamento

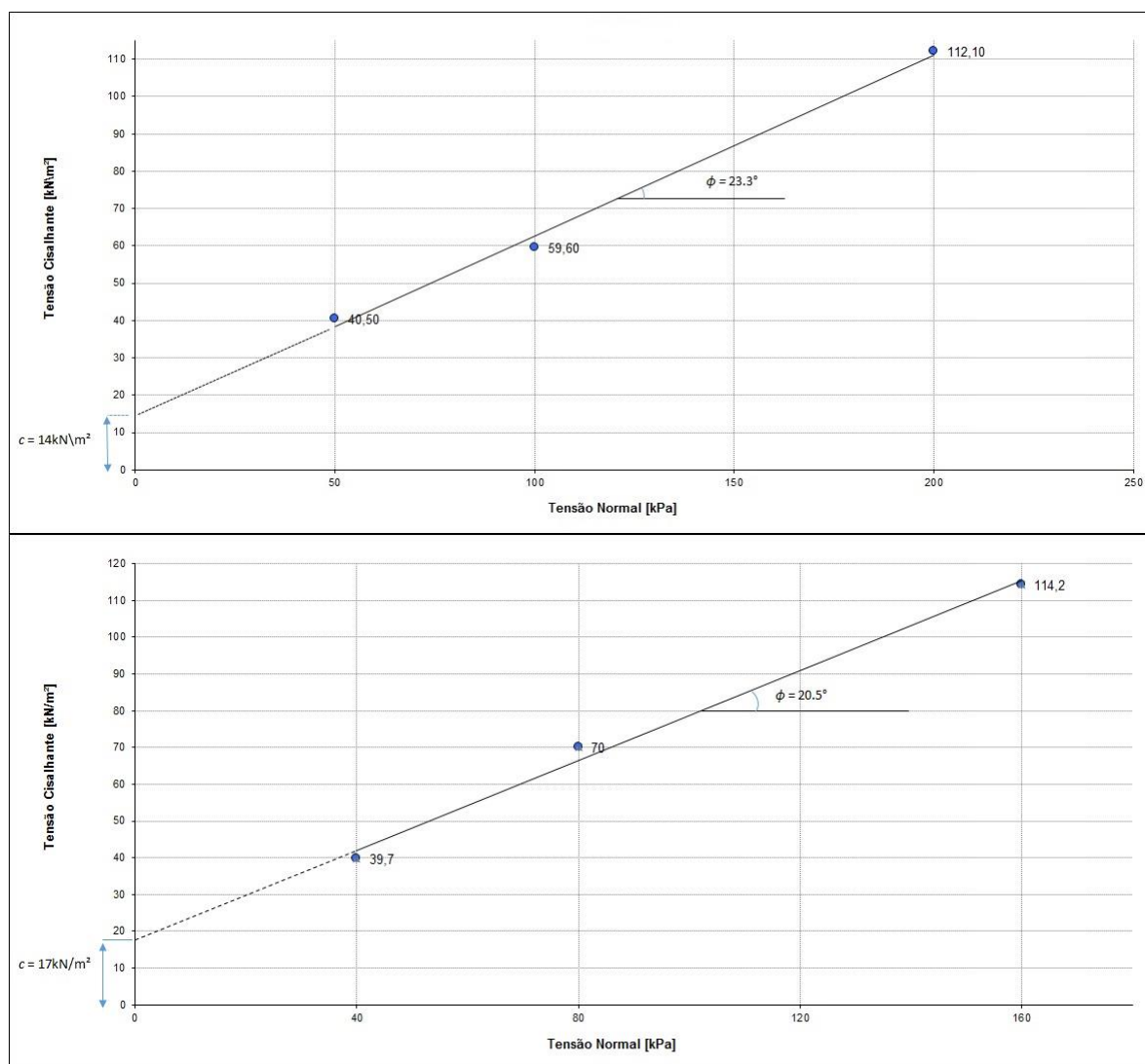


Figura 6-7 - Gráficos de tensão normal x tensão cisalhante, com os respectivos valores de coesão e ângulo de atrito, referentes aos ensaios realizados nas amostras de solos da bacia do Jacareí.

FONTE: O autor (2015).

Como resultado dos ensaios de cisalhamento, foram obtidos os valores de coesão e ângulo de atrito de dois pontos de amostragem distintos (Figura 6-7). O terceiro ensaio provou que o local de coleta havia sido movimentado durante o evento de 11 de março de 2015, havendo uma variação significativa nos valores determinados e, portanto, não foram levados em consideração.

Os gráficos mostram as linhas de tendência resultantes do cruzamento das tensões cisalhantes com as tensões normais, em amostras de Cambissolos e associações de Cambissolos com Neossolos.

O resultado da validação dos parâmetros extrapolados da bacia do rio Marumbi, para a bacia do rio Jacareí, comparado com os ensaios, está representado na Tabela 6-1.

Tabela 6-1 - Comparação dos índices físicos de solo das bacias do Marumbi e do Jacareí.

Classes de solos	Índices físicos	Valores KOZCIAK (2005)	Ensaios
Cambissolos	Coesão(c)	14,8 kN/m ²	14 kN/m ²
	Ângulo de Atrito(ϕ)	23,2°	23,3°
Assoc. Cambissolos e Neossolos	Coesão(c)	17 kN/m ²	17 kN/m ²
	Ângulo de Atrito(ϕ)	23,5°	20,5°

FONTE: O autor (2015).

Os ensaios de cisalhamento direto provaram que os valores determinados por Kozciak (2005) são semelhantes ao encontrados na bacia do Rio Jacareí. Para os horizontes de Cambissolos, ambos os parâmetros coesão e ângulo de atrito resultaram em diferenças mínimas, de 0,1° e 0,8 kN/m².

Para as associações de Cambissolos com Neossolos, a coesão é a mesma em ambas as bacias, e o ângulo de atrito apresentou uma variação de 3°.

Com a semelhança física dos horizontes amostrados, os outros solos – Hidromórficos, Argissolos e Neossolos com Afloramentos - tiveram os valores mantidos, extrapolados da bacia do rio Marumbi.

6.3.2 Mapa do Fator de Segurança

Completados todos os modelos espaciais referentes aos parâmetros físicos dos solos e realizada a modelagem, foi montado um mapa do Fator de Segurança da bacia hidrográfica do rio Jacareí, apresentado na Figura 6-8. É possível observar que as áreas constituídas basicamente por relevo plano não apresentam FS baixos. A razão disso está no fato de que são áreas sem riscos de escorregamentos, pois não apresentam declividades altas, nem ângulos de atrito elevados. As áreas de planícies recebem todo o aporte de sedimentos que são transportados das regiões mais íngremes.

Já áreas com uma variação maior na elevação, no ângulo de inclinação das vertentes, resultam em um relevo mais acidentado, apresentando muitos focos de suscetibilidade, o que é observado principalmente nas áreas a Sul e Sudeste da bacia, que foram as mais atingidas no evento de 11 de março de 2011.

Essas áreas a Sudeste são as porções mais acidentadas da bacia, que tem variações maiores nos ângulos de atrito e na elevação, chegando até 1400 metros de altitude. Os topos dessas elevações apresentam muitos afloramentos graníticos, sem horizontes de solos, porém estão em contato com muitas associações de Neossolos com afloramentos.

É importante observar que o modelo do Fator de Segurança não distingue esse afloramentos graníticos e por apresentarem elevada declividade, são confundidos com áreas suscetíveis a escorregamentos.

Além das porções a Sudeste, as áreas a oeste também apresentaram vertentes com Fator de Segurança entre 1 e 1,5, em grande parte próximas às áreas de fluxo divergente. A quantidade é significamente menor, se comparadas com a porção Sudeste, pois apresentam menor declividade.

A porção central da bacia apresentou em grande parte Fator de Segurança maior do que 2,0, porque é a região de planície, com baixa coesão e baixo ângulo de atrito, que apresenta maiores espessuras por serem planícies de inundação.

O Fator de Segurança considerado crítico está representado por valores abaixo de 1, porém comparado com as cicatrizes dos escorregamentos ocorridos, observa-se que muitas porções com valores entre 1 e 1,5 também sofreram movimentação. Nesse caso, o que pode distinguir a questão da movimentação ou de sua ausência, é

o mapa de probabilidade, que pode representar estas áreas com probabilidades baixas, porém diferentes de 0.

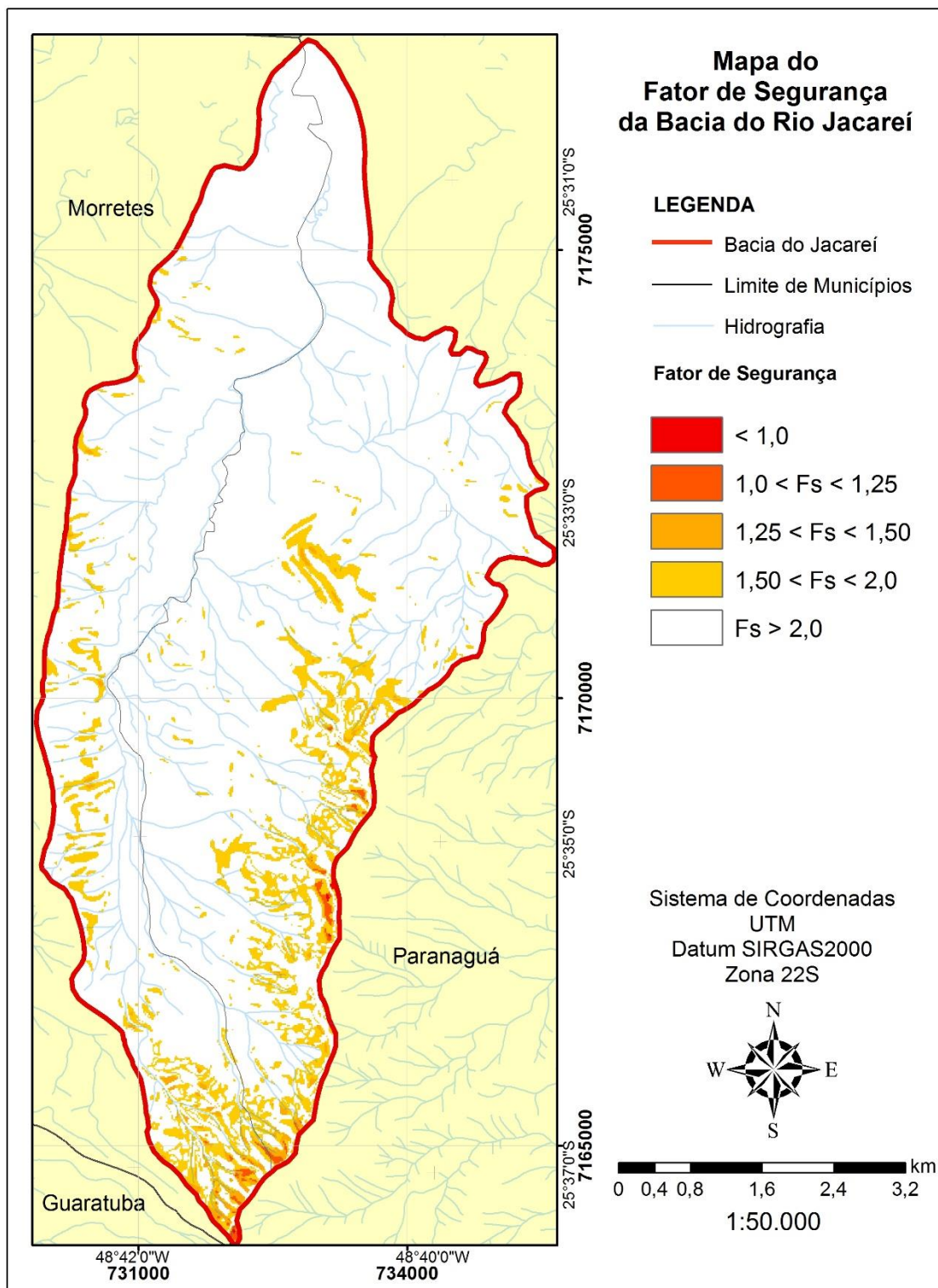


Figura 6-8 - Modelo espacial do Fator de Segurança da bacia do rio Jacareí.

FONTE: O autor (2015).

6.4 MODELO ESPACIAL DE PROBABILIDADE

O Modelo espacial que representa os valores do Z_c na área da bacia do rio Jacareí, está representado na Figura 6-9.

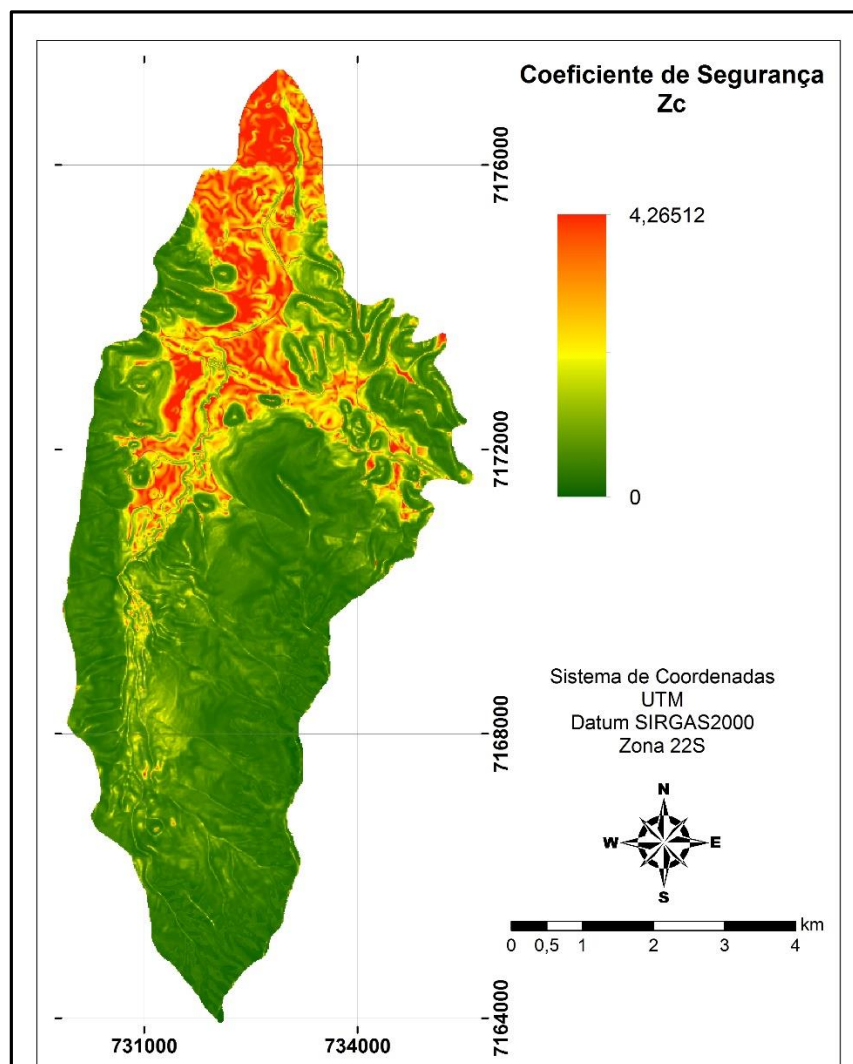


Figura 6-9 – Modelo espacial do Coeficiente de Segurança (Z_c).

FONTE: O autor (2015)

O resultado da reclassificação dos valores de Z_c , com base na Tabela de Distribuição Normal de Spiegel (1977), pode ser visto na Figura 6-10, como o modelo espacial de probabilidade de escorregamentos.

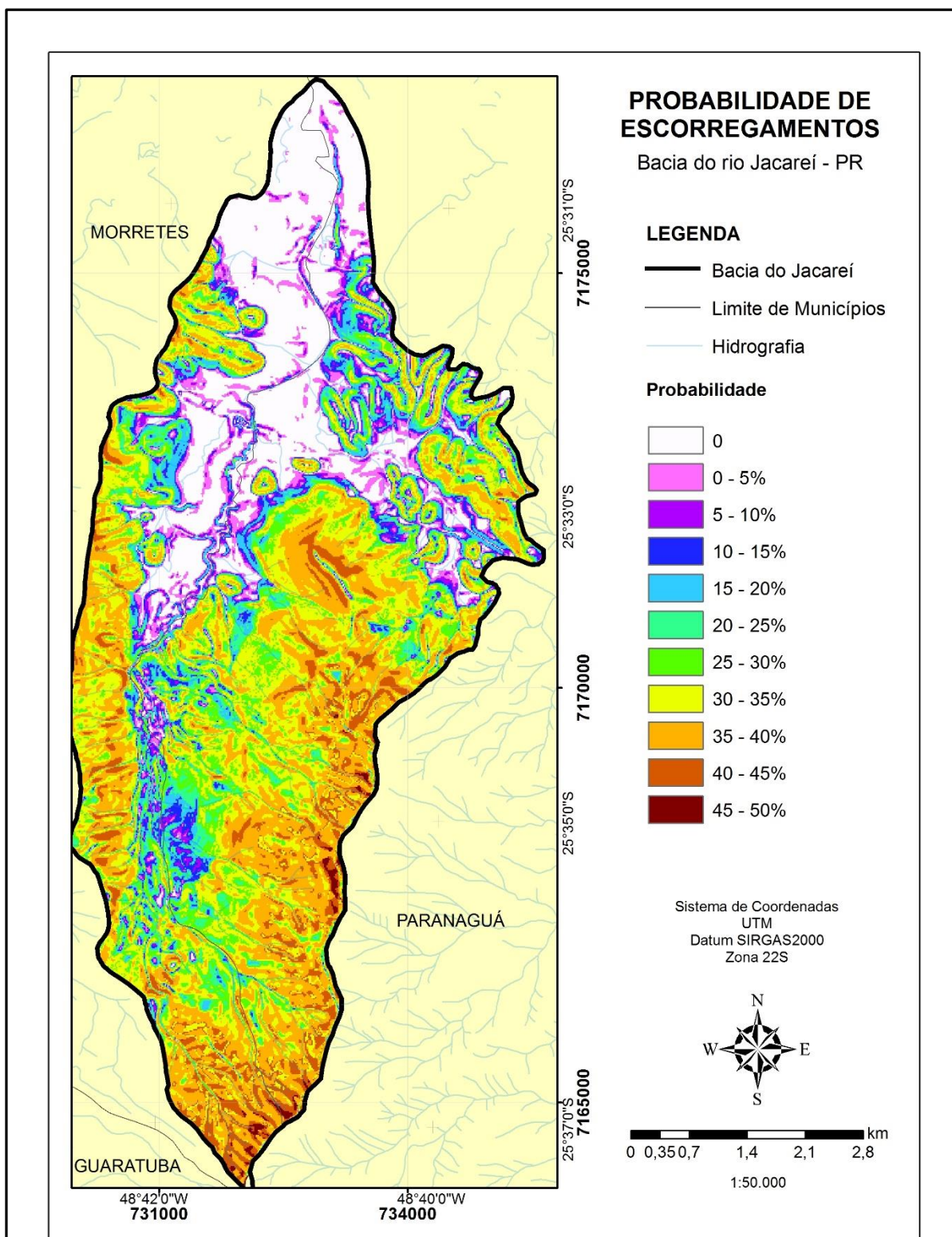


Figura 6-10 - Representação espacial da probabilidade de escorregamentos, a partir do coeficiente de segurança.

FONTE: O autor (2015).

Para representação do método, o modelo de probabilidade foi dividido em intervalos de classes, representando as áreas com probabilidades iguais a 50% e

maiores que 40%, 30%, 20% e 10%. As classes foram então sobrepostas pelas áreas das cicatrizes do evento de 11 de março, e com isso foram gerados mapas da intersecção entre as respectivas classes e as cicatrizes, para verificar a área correspondente à intersecção, e comparar com a área total das cicatrizes. Esta análise permitiu determinar a quantidade de cicatrizes que estão sobrepondo o intervalo de probabilidade definido, para o total, a partir da metodologia utilizada. O resultado encontrado está representado na Tabela 6-2.

Tabela 6-2 – Intervalos de probabilidade e a respectiva percentagem de cicatrizes de escorregamentos dentro dos intervalos.

Intervalo de Probabilidade (Máx. 50%)	Porcentagem de cicatrizes
≠ 0	99,71%
> 10%	99,65%
> 20%	99,42%
>30%	97%
>40%	74%
= 50%	0,37%

FONTE: O autor (2015)

Este resultado permitiu afirmar que o modelo representou 99,7% das cicatrizes com um valor de probabilidade diferente de 0. Destes, 99,6% apresentam probabilidade maior do que 10%, 99,42%, são probabilidades maiores que 20%, 97% maiores do que 30% e 74% maiores do que 40%. Apenas 0,3% das cicatrizes encontram-se em área de probabilidade igual a 50%, de acordo com o mapa.

O modelo mostrou que a maior quantidade das cunhas dos escorregamentos não encontram-se nas áreas com maior probabilidade e sim nas áreas com probabilidades próximas de 30%, em uma escala de 0 a 50%. Este fato pode ser explicado devido a muitas áreas com probabilidades próximas a 50% caracterizarem áreas de afloramentos rochosos, que apresentam altas declividades, porém não possuem grandes espessuras de solos. O modelo não distingue estas áreas e como consequência, as considera como áreas de elevada probabilidade. Devido a esta falta de distinção, pode-se dizer que para um modelo mais preciso, seria necessário analisar estas áreas de afloramentos separadamente, levando em consideração não somente a influência das camadas de solos, mas também realizar uma análise da

mecânica das rochas, nas áreas em que encontram-se em superfície, uma vez que o Fator de Segurança é utilizado apenas para escorregamentos de solos e não de rochas.

Diferente dos modelos apresentados por CARDINALI (2002) e LEE e PRADHAN (2006), a aplicação do método apresentado refere-se à modelagem da probabilidade de ocorrência de escorregamentos baseando-se somente na análise dos parâmetros físicos do solo e isso não exige uma análise multitemporal de eventos anteriores de escorregamentos, nem da frequência com que ocorrem. É um método que, aliado a informações de escorregamentos anteriores que auxiliam na validação dos resultados, serve para a prevenção dos eventos, uma vez que através da espacialização dos valores, pode afirmar quais são as áreas mais prováveis de ocorrência de movimentações.

6.5 MODELO ESPACIAL DE PROBABILIDADE COM BASE NAS VG

O modelo resultante da análise das cicatrizes de 11 de março de 2011, apresentou probabilidades que variaram de 1,5% a 16% nas cunhas dos escorregamentos. Esses valores de probabilidade, por se tratarem de uma retroanálise - que são baseados em algo que já aconteceu, sendo conhecidas as áreas dos escorregamentos - não contemplam as condições de precipitação e consequente saturação. São realizados com base apenas na porcentagem das áreas atingidas, pela porcentagem da área total. A Figura 6-11 ilustra a probabilidade de escorregamentos, nas áreas das cicatrizes de 11 de março de 2011. ilustra a variação na probabilidade.

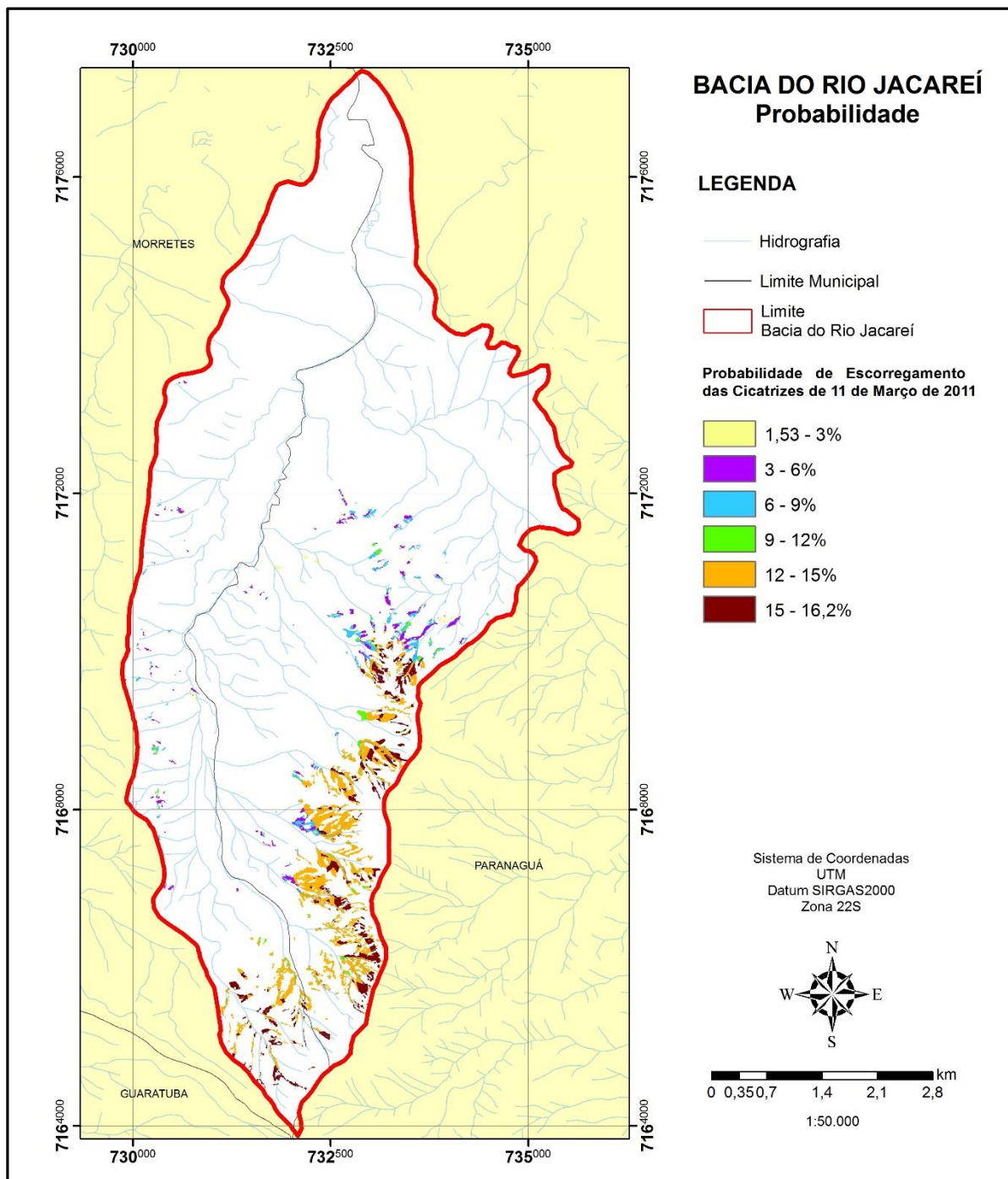


Figura 6-11 – Mapa da probabilidade de escoamentos, nas áreas das cicatrizes de 11 de março de 2011.

FONTE: O autor (2015).

Realizando uma comparação dos dois modelos de probabilidade, observa-se que em ambos cada vertente apresenta variação nos valores de probabilidade determinados.

Se for observada uma vertente aleatória de escoamento, é possível perceber que levando em consideração a direção de fluxo, as cunhas apresentam

probabilidades maiores no topo e menores na base, devido à variação de coesão, ângulo de atrito, peso específico, que ocorre dentro dessas cunhas. Isso pode ser observado no mapa, em que na mesma porção, houveram células com 1,5% de probabilidade, próximas a outras com 16%. Esta observação foi possível somente após a confecção do modelo através das VG, no qual a variação ficou mais evidente. No modelo preditivo, a variação observada chega a 30% em uma mesma vertente.

6.6 MAPA DO VOLUME DE MATERIAL SUSCETÍVEL A ESCORREGAMENTOS

Uma vez que o modelo de probabilidade é gerado dividindo-se as cunhas dos escorregamentos em células de iguais valores, pode-se calcular a área de cada cunha, transformando-as em *shapes* de polígonos. Além da área, como foi explicado no item 5.5, para o cálculo do volume deve-se obter o comprimento linear em cada cunha.

O resultado do cálculo do comprimento linear é apresentado na Figura 6-12, que representa o comprimento em cada cunha de muito alta suscetibilidade a escorregamentos somente, para que o mapa apresente melhor entendimento e não seja visualmente poluído.

Essa forma de modelagem apresentada sugere que sejam separadas somente as áreas com as quais se deseja trabalhar, na maioria dos casos as de maior probabilidade. Seguindo esta metodologia, o mapa mostra apenas as cunhas de 45 a 50% de probabilidade, para a representação espacial do volume.

Neste caso foram representadas apenas as mais suscetíveis, porém podem ser utilizadas as cunhas de qualquer intervalo de probabilidade.

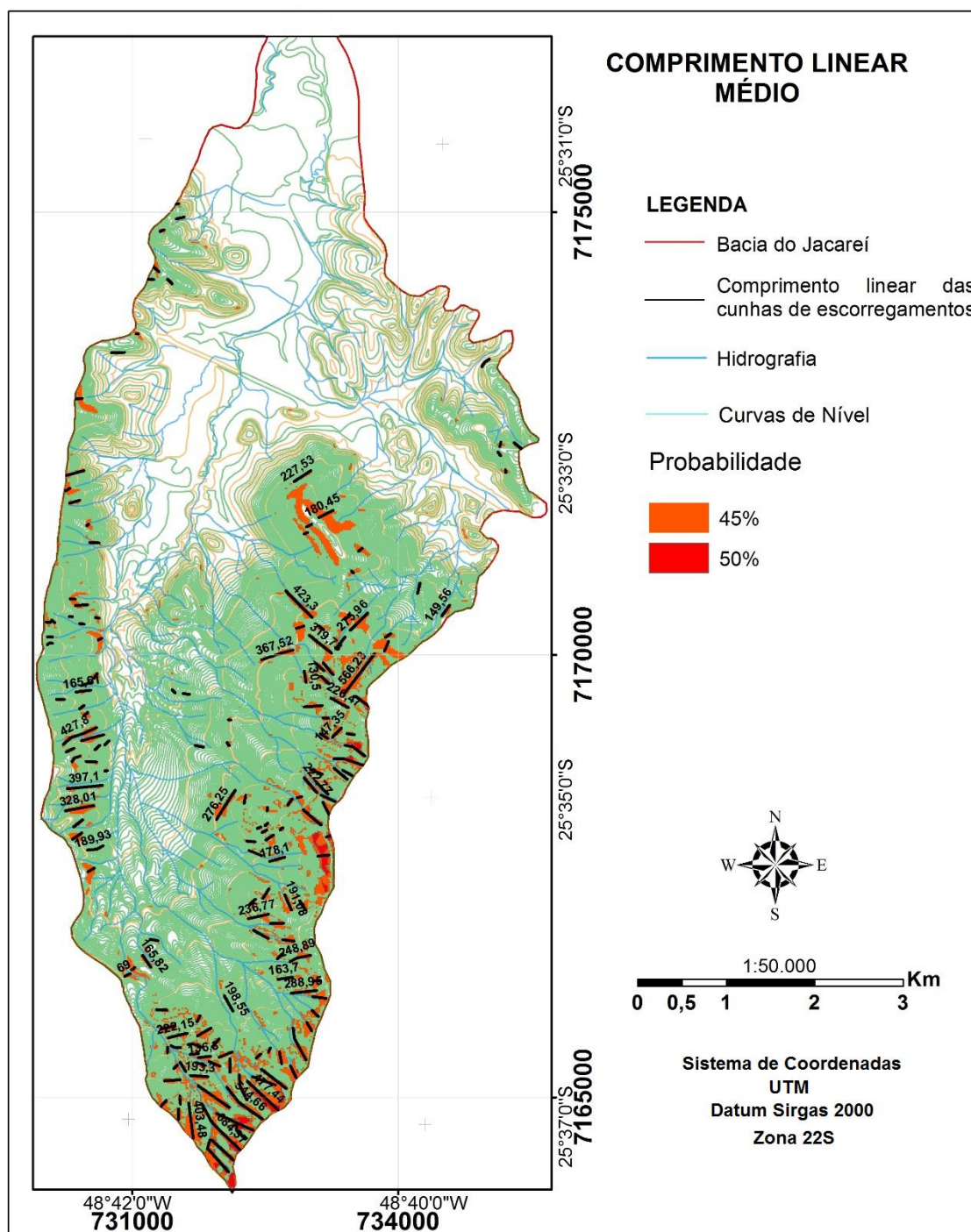


Figura 6-12 – Mapa do comprimento linear médio das cunhas com 45 a 50% de probabilidade de movimentação, representando áreas de muito alta suscetibilidade a escorregamentos.

FONTE: O autor (2015).

Os valores referentes ao volume de material suscetível a escorregamentos, nas áreas com 45 a 50% de probabilidade de movimentação, está representado na Figura 6-13. O mapa distingue as cunhas de escorregamentos por maior volume de material.

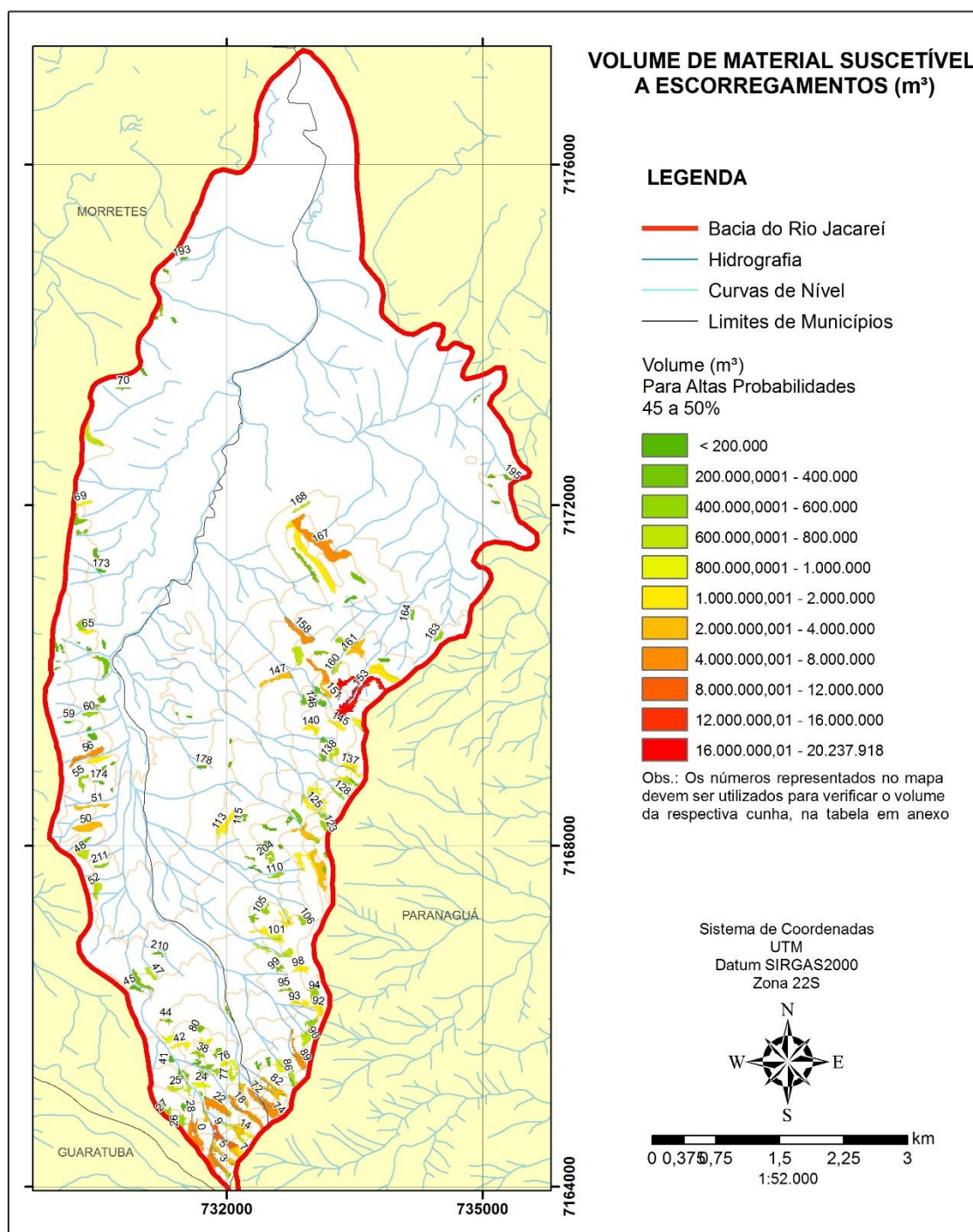


Figura 6-13 – Mapa do volume de material suscetível a escorregamentos, para as cunhas com muito alta probabilidade (45 a 50%).

FONTE: O autor (2015).

Junto ao mapa, são apresentados os valores, que são tão importantes quanto uma representação espacial, pois com eles é possível observar o volume em números de cada cunha suscetível a escorregamentos. A Tabela 6-3 apresenta todos os

volumes calculados, com as respectivas áreas numeradas de acordo com o número da cunha de escorregamento, apresentado na Figura 6-12.

Tabela 6-3 – Volume determinado para cada cunha de escorregamento, apresentada na Figura 6-12.

Número	VOLUME (m ³)	Número	VOLUME (m ³)	Número	VOLUME (m ³)	Número	VOLUME (m ³)
1	12271	40	120685	79	259218	118	523931
2	16129	41	128147	80	265530	119	536575
3	17065	42	131463	81	265723	120	551469
4	18194	43	134204	82	268561	121	574758
5	18943	44	135307	83	271562	122	576367
6	22810	45	140488	84	273196	123	600024
7	24139	46	140721	85	274697	124	613721
8	24541	47	146538	86	276020	125	616427
9	29650	48	146886	87	276450	126	618834
10	30288	49	160162	88	280559	127	621202
11	35780	50	171708	89	304152	128	668940
12	37048	51	172837	90	314923	129	668948
13	39802	52	174706	91	316394	130	691355
14	40323	53	180927	92	323890	131	693168
15	45546	54	181105	93	336026	132	700307
16	49061	55	181638	94	348142	133	706364
17	51173	56	182255	95	361318	134	713452
18	56927	57	184419	96	382824	135	714165
19	56954	58	184633	97	383187	136	716079
20	59481	59	185880	98	386419	137	735673
21	60276	60	186204	99	388500	138	753541
22	61353	61	186437	100	389660	139	760885
23	63624	62	187238	101	419145	140	775418
24	67334	63	188307	102	436899	141	811862
25	68327	64	196145	103	452705	142	825548
26	68734	65	204722	104	454293	143	868536
27	70471	66	206489	105	456607	144	893777
28	72779	67	209658	106	460806	145	921499
29	74095	68	210020	107	470767	146	928868
30	87479	69	211244	108	479518	147	932111
31	94714	70	211871	109	482780	148	937342
32	99588	71	211964	110	493091	149	939453
33	100515	72	211999	111	494058	150	1008558
34	101627	73	225678	112	500126	151	1009562
35	101789	74	230146	113	503174	152	1032739
36	112083	75	245398	114	511834	153	1054791
37	113158	76	246129	115	519228	154	1057141
38	114066	77	256614	116	521694	155	1062246
39	115977	78	257461	117	522956	156	1099319

Número	VOLUME (m ³)	Número	VOLUME (m ³)	Número	VOLUME (m ³)	Número	VOLUME (m ³)
157	1147732	168	1655370	179	2694708	190	5485909
158	1150530	169	1801605	180	2816573	191	5853725
159	1182306	170	1824583	181	2837498	192	6213385
160	1240553	171	1853437	182	3045523	193	6417775
161	1336174	172	2075655	183	3162966	194	6618044
162	1347424	173	2194865	184	3941969	195	6727923
163	1360831	174	2235284	185	3985364	196	6911015
164	1373630	175	2355945	186	4082144	197	8009616
165	1377410	176	2361637	187	4215164	198	20237918
166	1394670	177	2372165	188	4337965		
167	1462804	178	2405150	189	4591403	TOTAL:	204940481

FONTE: O autor (2015).

O modelo espacial de quantificação do volume é gerado através da probabilidade de escorregamentos e dessa forma não utiliza o relevo e a comparação de antes e após os eventos, para quantificar o material por diferenças na superfície do relevo. Esta é a principal diferença com relação aos trabalhos citados no referencial teórico (FIANI *et al.*, 2000; TSUTSUI *et al.*, 2007; MARCHESINI *et al.*, 2008).

O volume total de material suscetível a escorregamentos na bacia do rio Jacaré, para as áreas com alta probabilidade, de 45 a 50%, é de 204940481m³.

7 CONCLUSÕES

Uma vez que o trabalho baseia-se uma área de estudo já afetada por escorregamentos recentes, utilizados como base de comparação para a modelagem, é uma bacia que conhecidamente apresenta elevado grau de instabilidade. Tal fato é condizente com o modelo, que apresenta diversas cunhas com altas porcentagens de probabilidade, não só nas áreas que já foram alvo de movimentações, como também em cunhas próximas destas áreas, também suscetíveis ao mesmo problema. O modelo mostra um grande volume de material suscetível a movimentação, sendo que a bacia do rio Jacareí, quando afetada por fortes processos desencadeadores, como chuvas, ventos e o conjunto destes em um curto período de tempo, transforma esses eventos em grandes processos devastadores, devido à característica da morfologia do relevo, com grandes declividades e elevações chegando a 1400 metros.

Comparando as cicatrizes com o modelo de probabilidade, em ambos não foi possível correlacionar os escorregamentos com as estruturas observadas na análise geológica da região.

As cunhas dos escorregamentos apresentadas no modelo, bem como as representadas pelas cicatrizes dos eventos anteriores, encontram-se em sua maioria em áreas sem interferência humana. Quando sobrepostas à imagem *Worldview*, as áreas de pasto, plantio, construções e outros estão localizadas em sua totalidade nas partes mais baixas da bacia, ou seja, nas áreas suscetíveis ao acúmulo de material movimentado, portanto, conclui-se que os escorregamentos são resultado da dinâmica natural da Serra do Mar.

A representação espacial do método proposto por Fiori e Carmignani (2009), para o cálculo da probabilidade com base na análise do equilíbrio limite, foi adequada na identificação e cálculo da probabilidade de escorregamentos, tanto para áreas com elevadas probabilidades, nas partes mais declivosas e elevadas da bacia, quanto para as áreas com baixas probabilidades ou nulas, que se encontram em sua grande parte nas planícies.

Comparado com as cicatrizes dos escorregamentos de 11 de março de 2011, o modelo apresentou resultados satisfatórios, pois todas as áreas com probabilidades diferentes de 0 englobam as cunhas das cicatrizes em 99% dos casos observados.

Mesmo com resultados satisfatórios, para que o modelo seja mais preciso nos valores de probabilidade e conseqüentemente, no volume de material, é importante que exista uma boa malha de amostragem dos diversos tipos de solos, uma vez que o trabalho baseia-se exclusivamente nos parâmetros físicos do solo. Neste caso, para que fosse possível realizar a modelagem, devido à quantidade limitada de amostras, foi necessário utilizar os valores determinados por Kozciak (2005) para complementar as análises.

Já o modelo de probabilidade com base nas variáveis geomorfométricas se mostrou válido, porém não como base de comparação, sendo que foi utilizado para analisar a probabilidade de determinada cunha de escorregamento pertencer à variável geomorfométrica analisada. Seria o que se chama na matemática de probabilidade geométrica, determinando a área da cunha de escorregamento para a área total da classe da VG.

Um aspecto que deve ser levado em consideração é a necessidade de encontrar outra forma de calcular o comprimento linear das cunhas que representam os escorregamentos, pois foi necessário traçar uma a uma as retas que representam o comprimento, com base na direção de fluxo de cada vertente. É um trabalho de fácil realização, porém demorado. Dessa forma, quanto maior a área, mais demorado é o processo, de acordo com a quantidade de cunhas observadas.

Foi possível perceber as fragilidades e os pontos fortes na utilização da metodologia para a confecção dos modelos espaciais de probabilidade e quantificação do volume de material suscetível a escorregamentos. Como ponto positivo, é um método relativamente fácil de ser aplicado, não havendo a necessidade de utilizar fórmulas complexas e de difícil interpretação. Como ponto negativo conclui-se que sem uma boa amostragem o modelo torna-se aplicável, porém é necessária a verificação dos parâmetros envolvidos, para que o modelo se torne fiel à realidade da área em que foi aplicado.

De acordo com a metodologia, a tentativa de representar os valores quantitativos de probabilidade e de quantificação do volume de material suscetível a escorregamentos, em forma de modelos espaciais, se mostrou possível. Além disso, torna-se uma ferramenta eficaz para a análise de outras áreas que apresentam os

mesmos problemas, ou áreas que não possuem histórico, porém que apresentam características físicas similares.

O modelo determinou o volume potencial de material suscetível a escorregamentos em cada cunha, como mostrou a Tabela 6-3, porém não houve a possibilidade de verificação do real volume movimentado no eventos anteriores. Não foram encontrados resultados referentes ao volume de material resultante dos escorregamentos de 11 de março de 2011 em outros trabalhos. Uma possibilidade para o futuro, seria realizar esta comparação, podendo levar em consideração um dos métodos abordados no referencial teórico deste trabalho, uma vez que neles são realizados os cálculos através da análise dos eventos anteriores, utilizando métodos comparativos.

REFERÊNCIAS

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press, 1998.

CARDINALI, M.; REICHENBACH, P.; GUZZETTI, F.; ARDIZZONE, F.; ANTONINI, G.; GALLI, M.; CACCIANO, M.; CASTELLANI, M.; SALVATI, P. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, n. 2, p. 57-72. European Geophysical Society. 2002.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. 2006.

FENDRICH, R.; FERREIRA, M.A. Rosa de frequência dos ventos no Estado do Paraná. **Revista Acadêmica da PUC/PR**. v. 11, p. 49-57, 1995.

FIANI, M.; FAZIO, C.; BARBARELLA, M. Evaluation of landslide volume using photogrammetric techniques. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, pt. B4, p. 278-282. Amsterdam. 2000.

FIORI, A.P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas - aplicações na estabilidade de taludes**. Editora UFPR, Curitiba, 2009.

HUTCHINSON, M.F.; DOWLING, T.I. **A continental hydrological assessment of a new GRID based digital elevation model of Australia**. Hydrological Processes, Cap. 5, p. 45-58. Australia, 1991.

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

LEE, S.; PRADHAN, B. Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia. **J. Earth Syst. Sci.**, v. 115, n. 6, p. 661-672, dezembro. 2006.

MARCHESINI, I.; CONCETTI, C.; DE ROSA, P. A preliminary method for the evaluation of the landslides volume at a regional scale. **Geoinformatica**, n. 13, p. 277-289. 2008.

MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, abril. 1994.

MOORE, I.D., GRAYSON, R.B., LADSON, A.R. **Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications**. Hydrol. Process. n. 5, p. 3-30, 1991.

OKA-FIORI; SANTOS, L.J.C.; CANALI, N. E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. 2006. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000**. Minerais do Paraná – MINEROPAR, Curitiba, 2006.

OLIVER, M. A. "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems." **International Journal of Geographic Information Systems**. n. 4, p. 313–332. 1990.

PACK, R.T.; TARBOTON, D.G.; GOODWIN, C.N. **The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping**. Trabalho apresentado no 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada. setembro. 1998.

SELBY, M.J. **Earth's changing surface**. Oxford: Clarendon Press. 1985.

SILVEIRA, C.T. **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**. 152 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; FERREIRA, A.M.; FELIPE, R.S.; KEPEL FILHO, J.L.; FOLADOR, R.M.; COSTA, L.C. Análise do Fator de Segurança da estabilidade das vertentes na Bacia do Rio Jacareí, Serra do Mar paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 3, p. 287-297, 2012.

SPIEGEL, M.R. **Estatística: resumo da teoria, 875 problemas resolvidos, 619 problemas propostos**. McGraw-Hill do Brasil, 1977.

TRAUTH, M.H. **MatLab Recipes for Earth Sciences**. 2 ed. Springer: New York, 2007.

TSUTSUI, K.; ROKUGAWA, S.; NAKAGAWA, H.; MIYAZAKI, S.; CHIN-TUNG, C.; SHIRAIISHI, T.; SHIUN-DER, Y. Detection and volume estimation of large – scale landslides based on elevation – change analysis using DEMs extracted from high – resolution satellite stereo image. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 6, p. 1681-1696, junho. 2007.

VAN WESTEN, C.J.; VAN ASCH, T.W.J.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? **Bull. Eng. Geol. Env.** Springer-Verlag. n. 65. p. 167-184. 2005.

WU, T.H.; MCKINNELL III, W.P.; SWANSTON, D.N. Strenght of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 16, n. 1, p. 19–33. 1979.