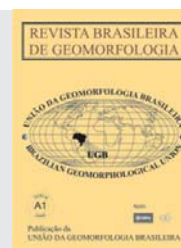




www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 15, nº 1 (2014)



MAPEAMENTO PRELIMINAR DA SUSCETIBILIDADE NATURAL A MOVIMENTOS DE MASSA DA SERRA DO MAR PARANAENSE APOIADO NA ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO

PRELIMINARY MAPPING OF THE NATURAL SUSCEPTIBILITY TO MASS MOVEMENTS IN THE PARANA COASTAL MOUNTAIN RANGE (SERRA DO MAR) SUPPORTED BY THE DIGITAL TERRAIN ANALYSIS

Claudinei Taborda da Silveira

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná.
Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Centro Politécnico - Bloco Setor de Ciências da Terra,
CEP: 81531-980, Caixa Postal 19099, Curitiba – Paraná, Brasil.
E-mail: claudinei.ufpr@yahoo.com.br*

Alberto Pio Fiori

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Centro Politécnico - Bloco Setor de Ciências da Terra,
CEP: 81531-980, Caixa Postal 19099, Curitiba – Paraná, Brasil.
E-mail: fiori@ufpr.br*

Priscila Schilipack

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná.
Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Centro Politécnico - Bloco Setor de Ciências da Terra,
CEP: 81531-980, Caixa Postal 19099, Curitiba – Paraná, Brasil.
E-mail: priscilaschilipack@hotmail.com*

Sarah Manzoli Dias

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Centro Politécnico - Bloco Setor de Ciências da Terra,
CEP: 81531-980, Caixa Postal 19099, Curitiba – Paraná, Brasil.
E-mail: smandias@gmail.com*

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
27/09/2012
Data de Aprovação:
11/12/2013

Palavras-chave:

Deslizamentos; corridas de detritos; inundações; corrida de lama.

Resumo:

Apoiando-se na compreensão de que o relevo é um importante condicionante dos processos de movimentos de massa nas vertentes e que a morfologia pode ser representada por atributos topográficos extraído de MDT, empregou-se a hipsometria, declividade e plano de curvatura, integrados por meio de álgebra de mapas, como variáveis representativas na elaboração do mapa de suscetibilidade da Porção Norte da Serra da Prata (PNSP), na Serra do Mar Paranaense, área que concentrou um conjunto de processos no evento climático ocorrido em 11/03/2011. Os resultados obtidos foram classes de muito alta, alta e moderada

Keywords:

Landslides; debris flow; floods; mud flow.

suscetibilidade, contemplando: a) processos de deslizamentos, b) corridas de detritos, c) deslizamentos e corridas de detritos em ação conjunta e d) inundações associadas a corridas de lama. O mapa foi comparado com um inventário de

cicatrizes que resultou em 89% de coincidência. Outra etapa de verificação apoiou-se em um conjunto de 86 pontos de controle de campo, desses 88% mostraram-se coincidentes com as unidades de suscetibilidade. Amparando-se na eficiência dos resultados obtidos para a PNSP os mesmos critérios foram empregados na elaboração do mapeamento preliminar da suscetibilidade a processos de movimentos de massa da Bacia Litorânea Paranaense (BLP), cujo produto deverá ser submetido à validação e controle de campo.

Abstract:

Based on the understanding that relief is an important condition of the processes of mass movement in slopes and that morphology can be represented by topographic characteristics extracted from DEM, we employed hypsometric, slope and plan curvature, integrated through the use of map algebra, as representative variables in the making of the map for natural susceptibility in the North Portion of Serra da Prata (PNSP), in the Parana Coastal Mountain Range, where there was a concentration of processes in the event in 11/03/2011. The results obtained for susceptibility class were: very high, high and moderate, contemplating: a) processes of landslides, b) debris flow, c) landslides and debris flow in joint action and d) flooding associated with mud flow. The map was compared to an inventory of scars that resulted in 89% of coincidence. Another phase of verification was supported by a set of 86 points of field control, of which 88% were coincident with the units of susceptibility. Based on the efficiency of the results obtained for the NPS, the same criteria were employed in the preliminary mapping of susceptibility to processes of mass movements in the Parana Coastal Basin (BLP), whose product should be submitted to validation and field control.

1. Introdução

A identificação e o mapeamento das áreas com predisposição à ocorrência de processos naturais catastróficos, que resultam em danos e ameaça a sociedade, é uma demanda de elevada importância, principalmente pelo papel que exerce em ações de planejamento e gestão ambiental, territorial e de riscos.

Um documento que se propõe a fazer a cartografia da predisposição a esses processos são os mapas de suscetibilidade. A análise da suscetibilidade envolve técnicas de natureza preditiva, objetivando definir os tipos de eventos perigosos e definir as condições espaciais e temporais de sua ocorrência (BITAR, 1995).

A região da Serra do Mar é reconhecida como um ambiente com elevada suscetibilidade a movimentos de massa, conforme apontado na literatura (FIORI, 1995a; FIORI e NUNES, 2003; FERNANDES *et al.*, 2004; KOSZIAK, 2005; VIEIRA, 2007; VIEIRA *et al.*, 2010; GEOPLANEJAMENTO, 2011; SILVEIRA *et al.*, 2013). Segundo Almeida e Carneiro (1998), esses processos participam da gênese evolutiva natural do relevo desse ambiente. Porém, sua ação sobre a população resulta em eventos danosos, quando não fatalistas.

Nesse contexto, cabe relatar o episódio mais re-

cente que ocorreu na Serra do Mar Paranaense. No dia 11/03/2011, associado a um elevado volume de chuva de 321mm registrado em 24 horas, e com chuva acumulada de 575mm em 72 horas, segundo dados da Estação Meteorológica Morretes (INMET, 2011), ocorreu num conjunto de escorregamentos, predominantemente translacionais, nas vertentes da Serra da Prata. O volume de material desprendido pelos escorregamentos, situados em geral no terço superior das vertentes, foi transportado pelos vales, remobilizando também depósitos pretéritos. Na planície aluvial, o material mais grosso depositou-se na desembocadura dos canais na forma de cones de detritos, enquanto que o material lenhoso e os sedimentos finos atingiram grandes extensões na planície na forma de corridas de lama. Esse conjunto de processos de movimentos de massa resultou em prejuízos por destruição total ou parcial de casas, ruas, estradas, pontes, lavouras, etc. Além dos danos materiais houve feridos e um caso de óbito.

Esse episódio demonstrou a necessidade de trabalhos de cartografia que representem a predisposição a processos de movimentos de massa nas vertentes na região da Serra do Mar Paranaense, o que direcionou a pesquisa para o estudo de técnicas de identificação de suscetibilidade aos processos envolvidos.

No entanto, destacam-se alguns desafios, como a falta de critérios consensuais pré-estabelecidos para a realização de mapeamentos de suscetibilidade, até mesmo porque os elementos considerados estão em acordo com os objetivos específicos de cada trabalho, processos contemplados na análise e conjunto de dados disponíveis, além da questão da escala que afeta substancialmente os resultados.

Essas questões levaram a formulação de um método baseado na análise digital do relevo, que se apoia na compreensão de que a partir da morfologia do relevo é possível estabelecer relações com os processos atuantes nas vertentes. Em concordância com essa compreensão, MacMillan e Shary (2009) apontam que o relevo tem sido constantemente usado para interpretar ou inferir processos atuantes na paisagem, pois a forma das vertentes afeta fluxos hídricos e de material na superfície e, conseqüentemente, interfere nos processos denudacionais e depósitos superficiais por meio de mecanismos de acumulação de fluxo hídrico.

Desse modo, amparado na relação intrínseca das formas de relevo com os processos foi possível obter-se elementos para a cartografia preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa na Serra do Mar Paranaense. A terminologia adotada de suscetibilidade natural a movimentos de massa compreende a pré-disposição espacial de ocorrência de processos, independente de seu período de recorrência, numa determinada área com base nos fatores condicionantes físico-naturais, refletidos e expressos na morfologia do relevo.

As técnicas empregadas na análise digital do relevo permitem a parametrização da morfologia do relevo com uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e pelo processo de extração de atributos quantitativos dos Modelos Digitais do Terreno (MDT), (HENGL, 2003). Essas variáveis obtidas são designadas aqui como atributos topográficos (MOORE *et al.*, 1991 e 1993; WILSON e GALLANT, 2000). A parametrização do relevo refere-se à representação quantitativa das características morfológicas da paisagem descritas de forma contínua. Esse campo do conhecimento vem sendo designado de geomorfometria (WOOD, 1996 e 2009).

Assim, fazendo uso das técnicas de geomorfometria, foi reconhecido na porção norte da Serra da Prata, região central da Serra do Mar Paranaense, uma estreita relação entre atributos topográficos com as cicatrizes re-

sultantes dos movimentos de massa do evento de 2011. Verificou-se uma relação direta da declividade com os processos de escorregamentos translacionais e áreas de inundação fluvial; do plano de curvatura com as corridas de detritos; e a posição topográfica, expressa pela elevação, com os escorregamentos e corridas de lama associada às inundações. Desse modo, esses atributos topográficos foram empregados na obtenção das classes de suscetibilidade, contemplando especificamente os processos de escorregamento translacional, corridas de detritos e inundações associadas a corridas de lama e depósitos, seguindo a classificação dos movimentos de massa apresentada por Augusto Filho (1992).

O trabalho assume a ideia de assinatura geométrica, proposta por Pike (1988), que é definido como o conjunto de medidas que descrevem as formas topográficas para distinguir diferentes formas de relevo e processos. A combinação dos atributos topográficos permite a identificação de diferentes segmentos de vertentes condicionados a processos de movimentação de material e fluxo hídrico em superfície.

Essa abordagem permite a elaboração de um modelo de distribuição de unidades preliminares, oferecendo suporte em trabalhos de mapeamento de suscetibilidade. Permite avaliar grandes regiões em escalas maiores na medida em que se tenham dados de modelos digitais em escalas mais detalhadas, o que aparece como um percalço no estudo da Serra do Mar Paranaense, que só dispõe de cartas topográficas na escala 1:25.000. Desse modo, o tratamento e a inferência da suscetibilidade preliminar, resultante dessa pesquisa, está condicionada a qualidade da base de dados disponível, apresentando-se satisfatória na escala 1:50.000.

Foram tratadas duas áreas de estudo: A e B (Figura 1). A primeira é representada por um retângulo na Porção Norte da Serra da Prata (PNSP), que corresponde a 45,23km² e a segunda corresponde a uma área que abrange grande parte da Bacia Litorânea Paranaense (BLP), com 4.587 km².

O tratamento dos dados de inferência na área B apoiou-se na extrapolação dos resultados obtidos e nas interpretações verificadas na área A. Por isso, o produto resultante para a extensão da área B não é de um mapeamento final, mas sim um produto preliminar que demanda intenso controle de campo e posterior revisão e/ou reformulação. Cabe destacar ainda que nem todas as áreas situadas na BLP são condicionadas

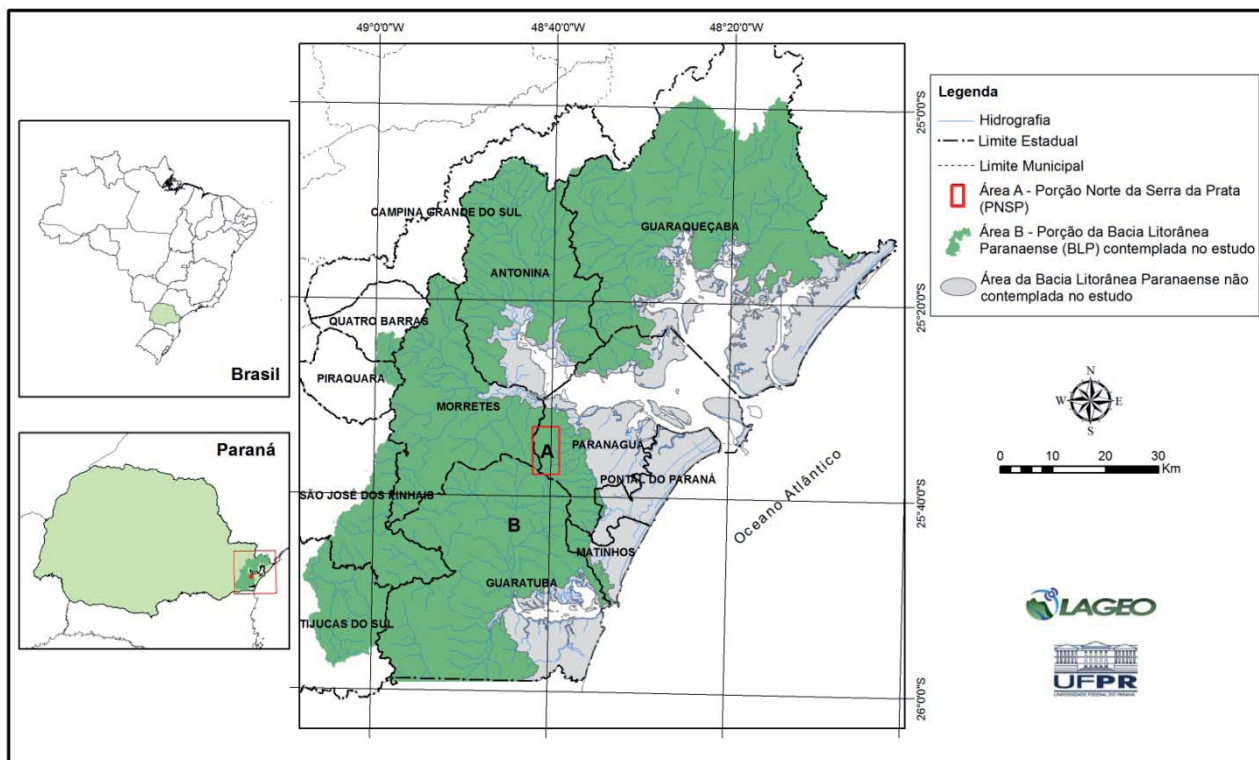


Figura 1 - Localização das áreas de estudo.

aos processos avaliados na combinação dos atributos topográficos selecionados, por isso a área B não abrange sua totalidade.

2. Método e Materiais

As etapas cumpridas para o trabalho de mapeamento foram: 1) Organização dos dados, geração do MDT e dos atributos topográficos; 2) Tratamento de imagem de satélite e inventário das cicatrizes dos movimentos de massa; 3) Avaliação da relação entre os atributos topográficos e as cicatrizes; 4) Discretização dos atributos topográficos e sua integração para a definição das classes de suscetibilidade a movimentos de massa; 5) Comparação dos resultados da área da PNSP com o inventário de cicatrizes; 6) Extrapolação dos resultados obtidos na PNSP para o mapeamento preliminar da suscetibilidade a movimentos de massa na BLP e retirada das áreas de exceção no recorte geográfico.

2.1. Organização dos dados, geração do MDT e dos atributos topográficos

A partir dos dados planialtimétricos extraídos de quarenta e nove cartas topográficas, na escala 1:25.000

(DSG, 1998; 2000; 2001; 2002; 2003; 2004), com edição topológica da drenagem e de atributos para curvas de nível e pontos cotados, foi produzido o MDT na estrutura de grade regular retangular (GRID) com resolução espacial de 15 metros utilizando o algoritmo de interpolação ANUDEM desenvolvido por Hutchinson (1989), no software ArcGIS 10 (ESRI, 2010). A definição da resolução espacial seguiu a proposta de Hengl (2006) para determinar o tamanho da célula da grade apoiado em dados de contornos das curvas de nível da área de estudo, conforme expressa a equação 1. O valor obtido indicado foi de 15m.

$$\lambda = \frac{A}{2 \cdot \sum l} \quad \text{Equação 1}$$

As operações para a geração dos atributos topográficos foram executadas por meio de janelas móveis 3x3 no MDT de estrutura GRID (Figura 2-a). Essa técnica consiste em calcular os parâmetros de uma célula central apoiado nos valores da elevação das oito células vizinhas, deslocando-se sobre a grade (Figura 2-c) onde é executada uma varredura com essa janela sobre o conjunto total de dados. O espaçamento da grade, resolução das células, representado na Figura 2-b foi adotado com $\lambda = 15$ metros.

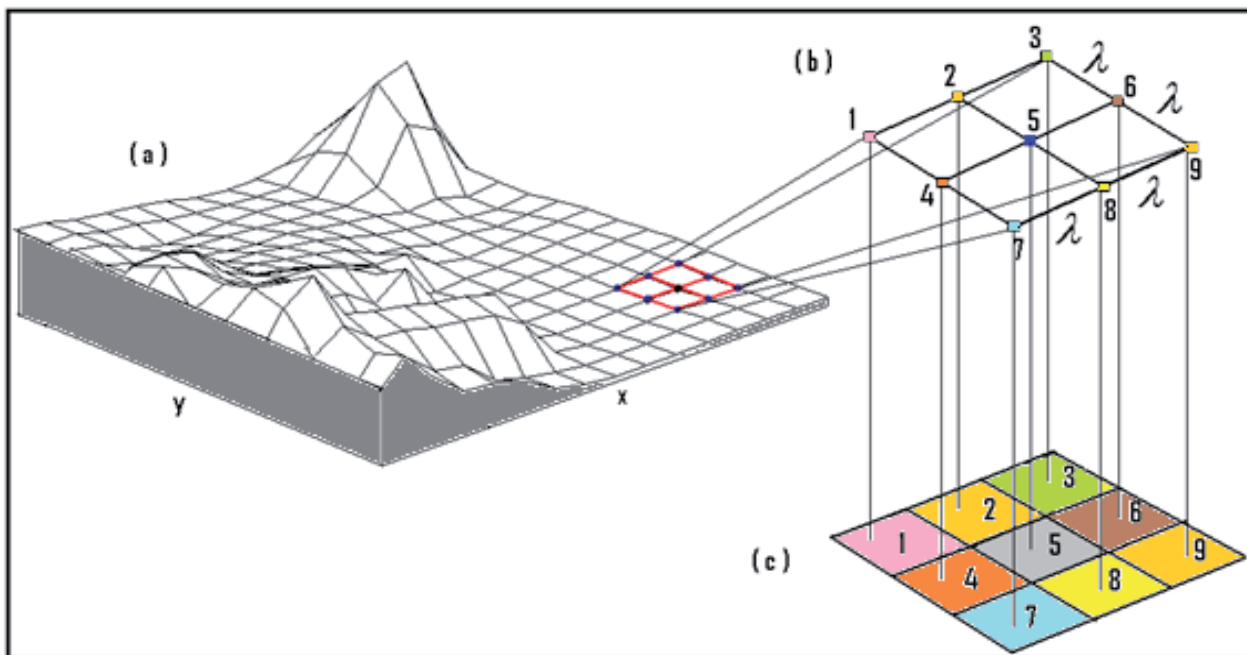


Figura 2 - Representação do MDT na estrutura GRID e janela móvel 3x3.

As operações sobre o MDT permitiram calcular as derivadas direcionais empregando a vizinhança local 3 x 3 representada na Figura 3, onde os valores de Z_i são representados pela elevação, distribuída regularmente numa matriz.

O polinômio empregado no cálculo das derivadas direcionais para a declividade foi de Horn (1981) e para o plano de curvatura foi de Zevenbergen e Thorne (1987). A opção se deve em virtude de ser o cálculo adotado na extensão do ArcGis, do módulo Spatial Analyst (ESRI, 2010).

O atributo topográfico declividade (β), em valores percentuais, foi obtido conforme descrito na equação 2, cuja derivada direcional leste-oeste (G) é apresentada na equação 3 e a derivada direcional norte-sul (H) na equação 4, de acordo com o polinômio de Horn (1981):

Z_1	Z_2	Z_3
Z_4	Z_5	Z_6
Z_7	Z_8	Z_9

Figura 3 - Vizinhança local da janela móvel 3x3

$$\beta = \sqrt{(G^2 + H^2)} \quad \text{Equação 2}$$

$$G = \frac{(Z_3 + 2Z_6 + Z_9) - (Z_1 + 2Z_4 + Z_7)}{8\lambda^2} \quad \text{Equação 3}$$

$$H = \frac{(Z_1 + 2Z_2 + Z_3) - (Z_7 + 2Z_8 + Z_9)}{8\lambda^2} \quad \text{Equação 4}$$

As variáveis Perfil de curvatura (φ) e Plano de curvatura (ω), expressas nas equações 5 e 6, foram calculadas conforme as derivadas D, E, F, G e H do polinômio de Zevenbergen e Thorne (1987), respectivamente representados nas equações 7 a 11.

$$\varphi = \frac{2(DG^2 + EH^2 - FGH)}{G^2 + H^2} 100 \quad \text{Equação 5}$$

$$\omega = \frac{2(DH^2 + EG^2 - FGH)}{G^2 + H^2} 100 \quad \text{Equação 6}$$

$$D = \frac{(Z_4 + Z_6) - Z_5}{\lambda^2} \quad \text{Equação 7}$$

$$E = \frac{\frac{(Z_2 + Z_8)}{2} - Z_5}{\lambda^2} \quad \text{Equação 8}$$

$$F = \frac{(-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)}{4\lambda^2} \quad \text{Equação 9}$$

$$G = \frac{-Z_4 + Z_6}{2\lambda} \quad \text{Equação 10}$$

$$H = \frac{Z_2 - Z_8}{2\lambda} \quad \text{Equação 11}$$

2.2. Tratamento da imagem de satélite e elaboração do inventário

Foi utilizada uma imagem de satélite *WorldView-1* (DIGITALGLOBE, 2011), com banda pancromática (na faixa de comprimento de onda de 397 a 905nm), com resolução espacial de 0,60m no nadir e 0,59m a 25° off nadir, com data de imageamento de 05 de maio de 2011, recobrando uma área retangular sobre a Porção Norte da Serra da Prata (PNSP), com o objetivo de identificar e mapear os polígonos das cicatrizes que resultaram dos processos de movimentos de massa.

Sobre a imagem *WorldView-1* foram empregadas técnicas de ortorretificação, apoiadas no MDT, e correção geométrica com base nas cartas 1:25.000. Assim, obteve-se uma ortoimagem com a correção das distorções do imageamento e do relevo e resolução espacial de 0,6m.

Na ortoimagem foi possível classificar, por meio de distinção visual, segundo ilustrado na figura 4, as cicatrizes de escorregamentos (Figura 4-a), de corridas de detritos (Figura 4-b) e das áreas que foram inundadas e sofreram com corridas de lama (Figura 4-c). Esse procedimento resultou finalmente no inventário de cicatrizes de movimentos de massa da PNSP (Figura 5), seguindo a terminologia empregada na classificação de Augusto Filho (1992).

2.3 Avaliação da relação entre os atributos topográficos e as cicatrizes

Com o intuito de avaliar as relações existentes entre as formas de relevo, representadas pelos atributos topográficos, com os processos de movimentos de massa, representados pelas cicatrizes inventariadas, foram elaborados histogramas de frequência.

As figuras 6, 7 e 8 demonstram a distribuição dos

valores contínuos dos atributos topográficos na área A (PNSP) e sobre as cicatrizes de movimentos de massa. São apresentados os atributos que demonstraram melhor relação com os processos inventariados.

A figura 6-a apresenta a distribuição dos valores de elevação (em metros) sobre toda a área da PNSP, a figura 6-b os valores de elevação apenas sobre as áreas das cicatrizes classificadas como deslizamento, a figura 6-c sobre áreas das corridas de detritos e a figura 6-d sobre as áreas de inundação associadas a corridas de lama.

A figura 7-a apresenta a distribuição dos valores de declividade (%) sobre toda a área da PNSP, a figura 7-b sobre as áreas das cicatrizes classificadas como deslizamentos, a figura 7-c sobre áreas das corridas de detritos e a figura 7-d sobre as áreas de inundação associadas a corridas de lama.

A figura 8-a apresenta a distribuição dos valores do plano de curvatura sobre a área da PNSP, a figura 8-b sobre as áreas das cicatrizes classificadas como deslizamentos, a figura 8-c sobre áreas das corridas de detritos e a figura 8-d sobre as áreas de inundação associadas a corridas de lama.

2.4. Discretização dos atributos topográficos e sua integração para a definição das classes de suscetibilidade a movimentos de massa

Os atributos topográficos que apresentaram melhor relação com os processos de movimentos de massa inventariados do evento foram: hipsometria, declividade e plano de curvatura. Desse modo, esses foram empregados na elaboração do mapa de suscetibilidade.

A hipsometria refere-se à variação do valor de altitude, representados por classes de elevação, cujos valores são expressos em metros acima do nível do mar. As classes discretizadas foram: elevações inferiores a 20m, entre 20 e 40m, 40 e 400m e acima de 400m, representada na Figura 9-a. Os intervalos atendem a distribuição dos processos de deslizamentos e inundações associadas a corridas de lama verificados na sobreposição com as cicatrizes (Figuras 6-b e 6-d).

A declividade é definida como um plano tangente à superfície, que corresponde à inclinação do terreno em relação ao plano horizontal, expresso como a mudança de elevação sobre certa distância (BURROUGH, 1986). Tem sido considerada como um dos mais importantes atributos topográficos na identificação de processos de

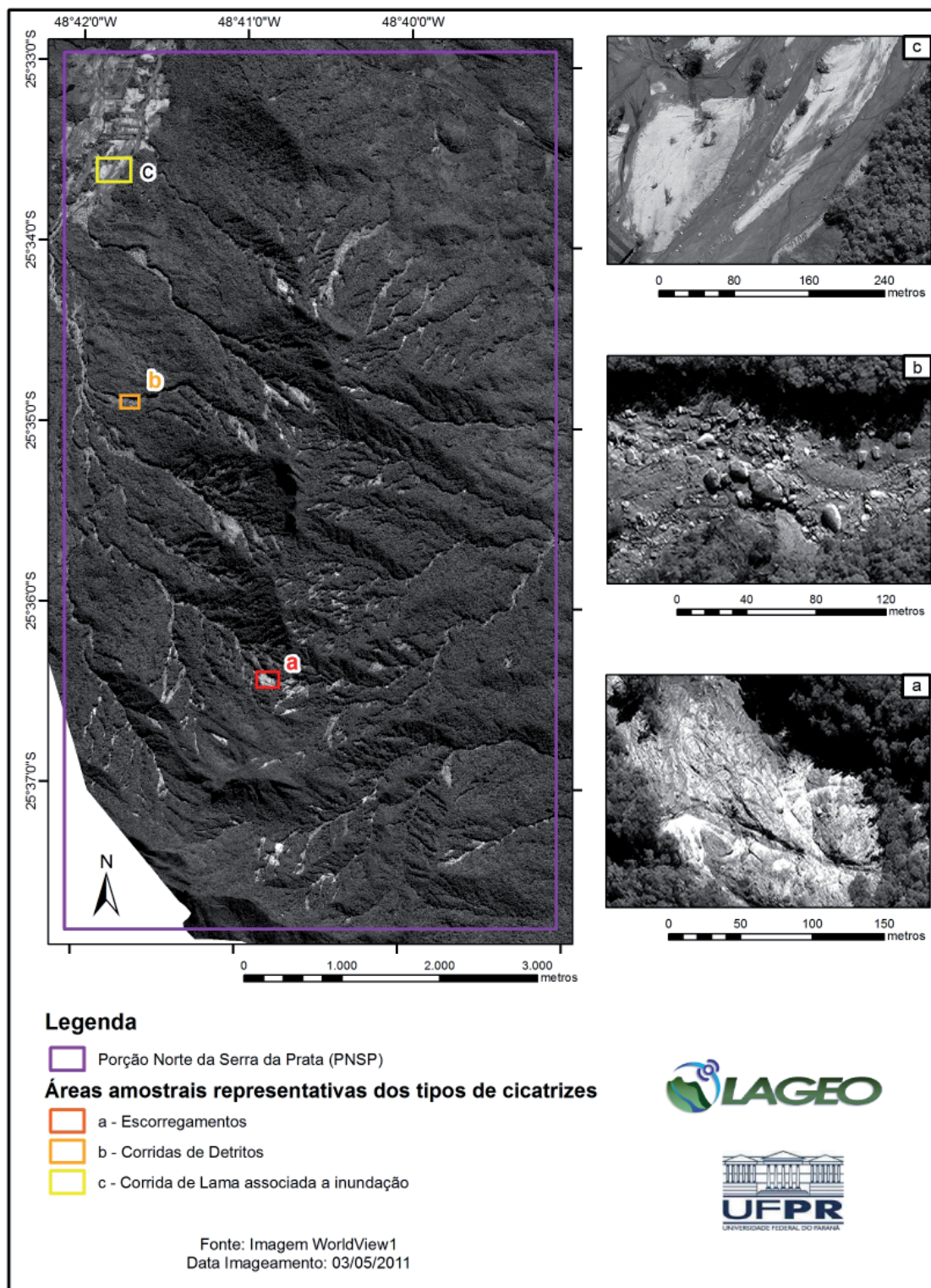


Figura 4 - Ortoimagem Worldview1: a) exemplo de cicatriz de área de escorregamento, b) de corrida de detritos; c) de áreas que foram inundadas e sofreram com corridas de lama.

movimento de massa, principalmente tratando-se de deslizamentos em modelos determinísticos do fator de segurança de vertentes (ex.: FERNANDES et al., 2001; GUIMARÃES et al. 2003; KOZCIAK, 2005; VIEIRA,

2007; TABALIPA, 2008; SILVA et al, 2012; SILVEIRA et al., 2013; dentre outros).

As classes discretizadas da declividade seguiram os seguintes intervalos: inferiores a 6%, entre 6 e 25%

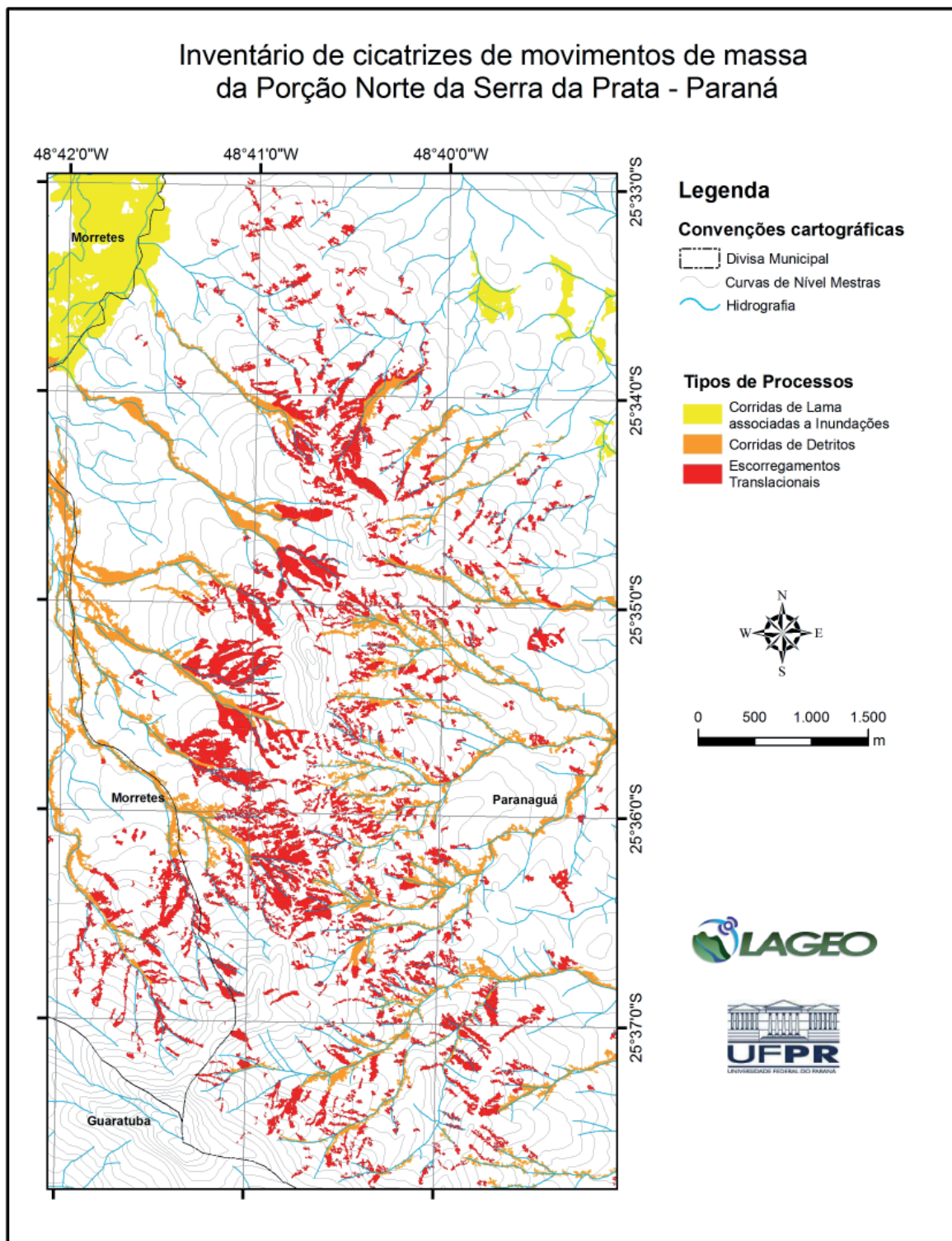


Figura 5 - Inventário de cicatrizes de movimentos de massa na PNSP (11/03/2011).

e superior a 25% (Figura 9-b). Os intervalos foram definidos pela relação verificada entre os processos de deslizamentos e inundações associadas a corridas de lama, e a sobreposição com as cicatrizes (Figuras

7-c e 7-d).

O plano de curvatura, ou curvatura em planta, refere-se ao caráter divergente/convergente dos fluxos de matéria sobre o terreno quando analisado em projeção

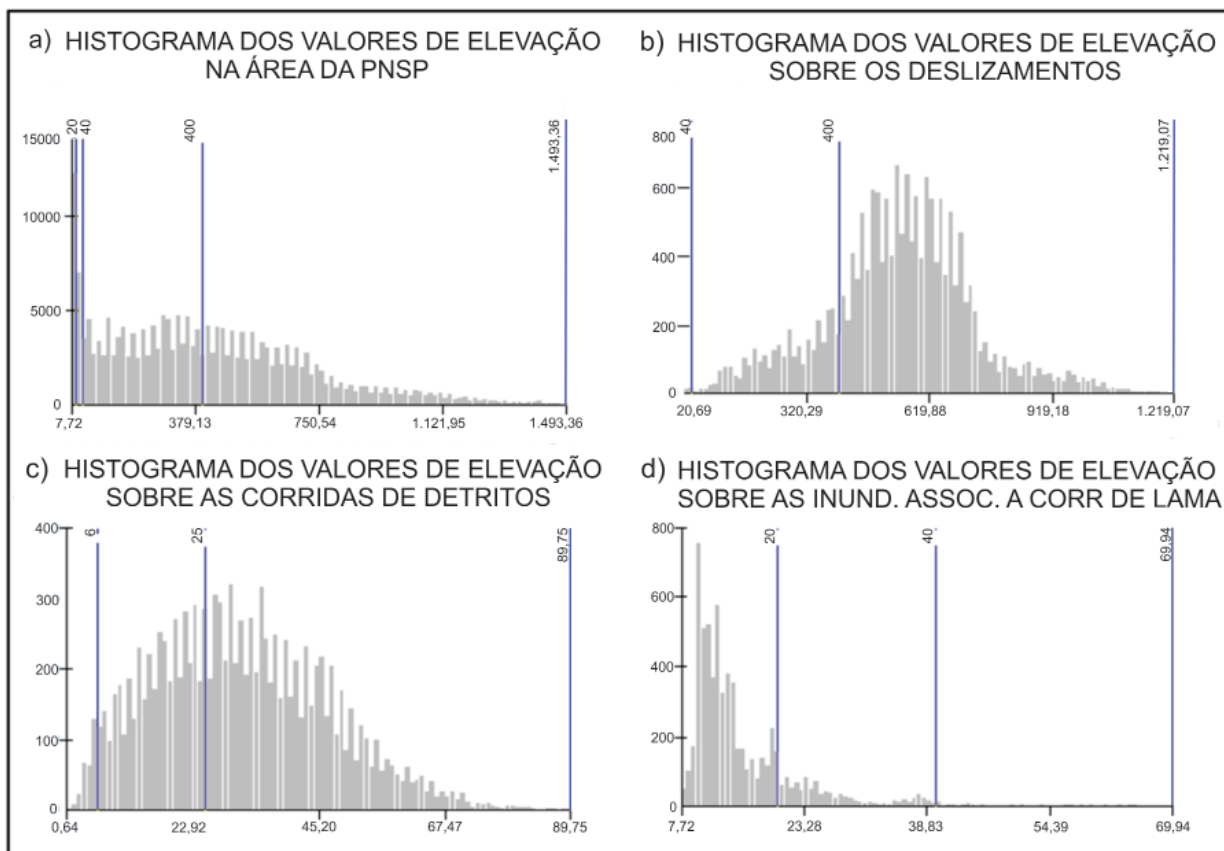


Figura 6 - Histogramas de frequência dos dados de elevação.

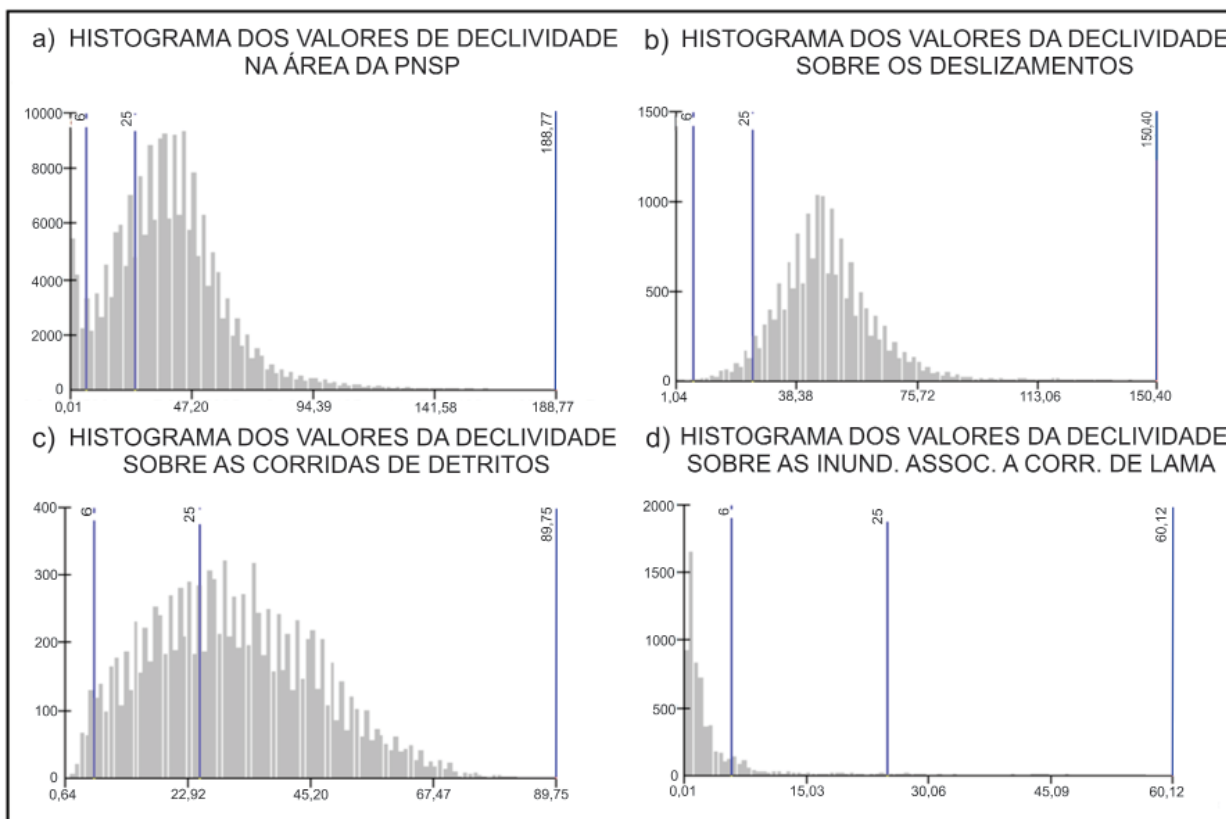


Figura 7 - Histogramas de frequência dos dados de declividade.

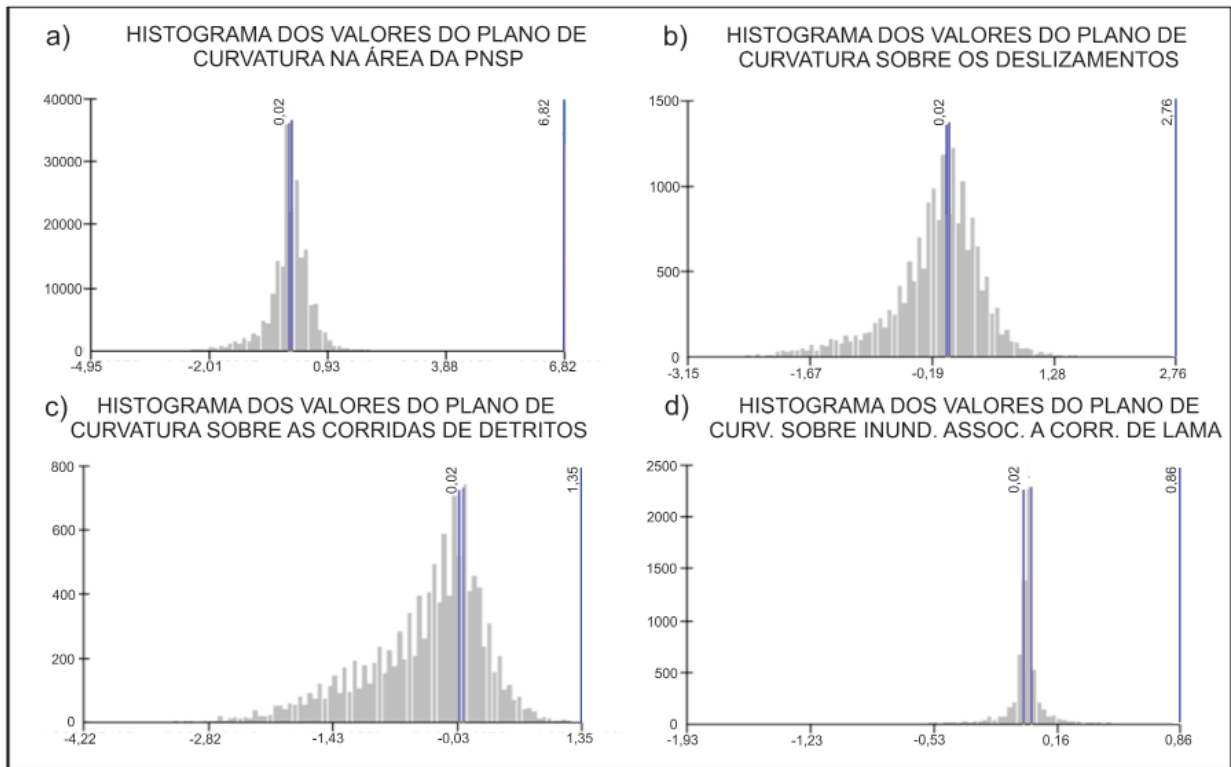


Figura 8 - Histogramas de frequência dos dados do plano de curvatura.

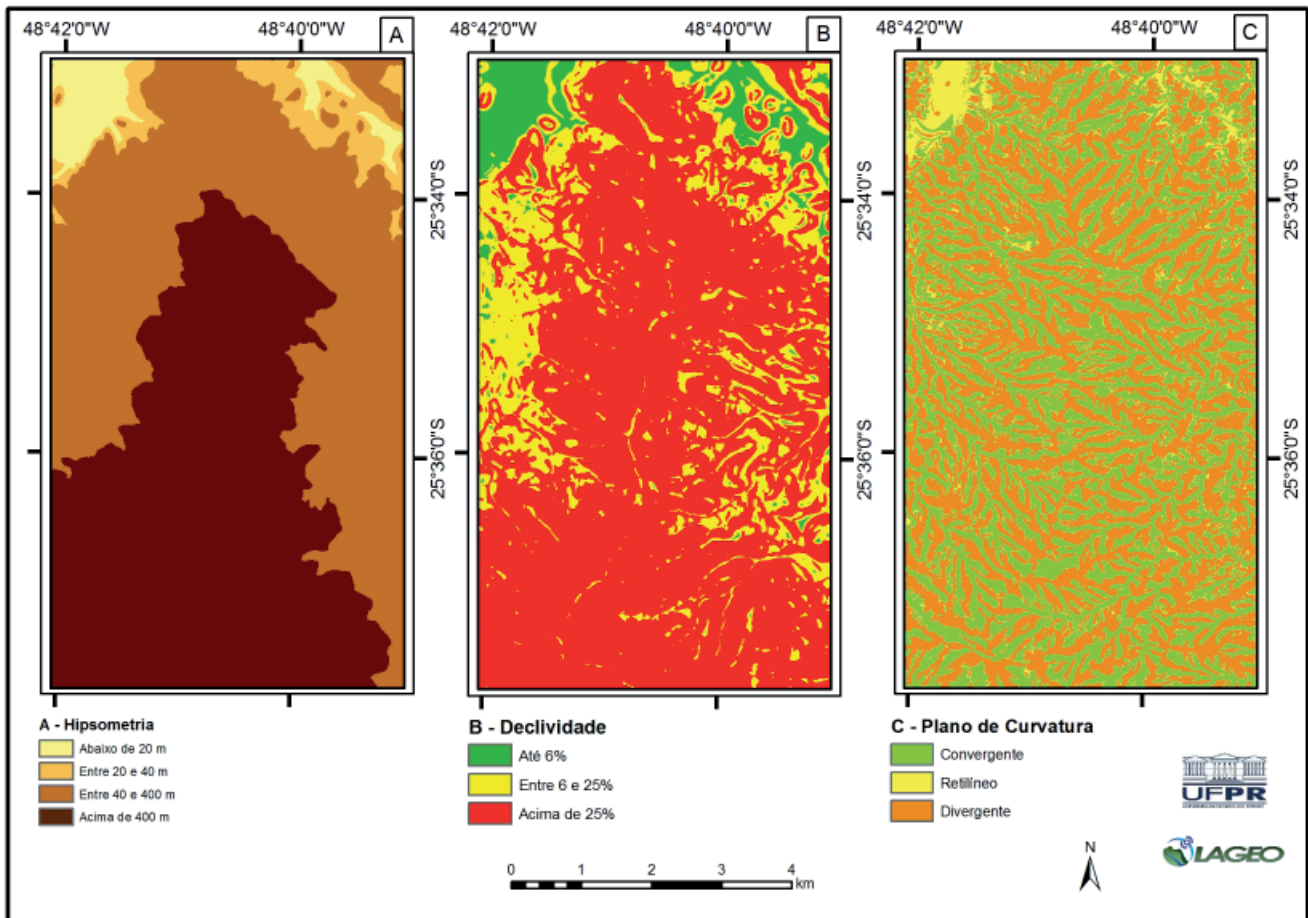


Figura 9 - Hipsometria, declividade e plano de curvatura da área da PNSP.

horizontal (VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003), com importante emprego para caracterizar processos relacionados ao transporte de sedimentos, pois demonstra a propensão da água convergir ou divergir sobre as vertentes (GALLANT e WILSON, 2000). Muitos esforços para automatizar classificação das formas do relevo têm sido realizados fazendo uso desta relação inferida entre a curvatura da superfície e processos de erosão ou de deposição (MACMILLAN e SHARY, 2009).

O atributo topográfico plano de curvatura foi representado em três classes (Figura 9-c), cujos valores inferiores a -0,02 representam segmentos de vertentes convergentes, superiores a 0,02 segmentos divergentes e valores intermediários a essas classes são segmentos planares.

A técnica empregada na integração dos atributos topográficos para a inferência preliminar da suscetibilidade foi a álgebra de mapas, executada no *software ArcGis versão 10* (ESRI, 2010), com o módulo *Spatial Analyst*. Conforme Tomlin (1983), a álgebra de mapas representa o conjunto de procedimentos de análise espacial em geoprocessamento que produz novos dados a partir de funções de manipulação aplicadas a um ou mais níveis de informação.

Desse modo, a combinação das classes de hipsometria, declividade e plano de curvatura apoiou-se nos critérios estabelecidos pela designação de valores (Tabela 1). Por meio da tabulação cruzada os mapas foram somados, no formato matricial, resultando em uma combinação de três dígitos que se remetem às classes de suscetibilidade (Tabela 2), qualificadas em três intensidades: moderada, alta e muito alta. Sua pré-disposição natural refere-se aos processos de movimentos de massa na forma de escorregamentos, corridas de detritos e inundações associadas a corridas de lama.

2.5. Comparação dos resultados da PNSP com o inventário de cicatrizes e pontos de controle de campo

A qualidade do mapeamento das classes preliminares de suscetibilidade identificadas na PNSP, área A, foi avaliada por meio da comparação com as cicatrizes inventariadas (Figura 5), que representam a verdade de campo, obtendo-se a Exatidão Global (EG).

A EG representa o percentual de concordância e discordância entre uma informação levantada e a informação de referência, indicando a acurácia das classes de suscetibilidades inferidas.

Foi obtida pela sobreposição entre o mapa preliminar da suscetibilidade, considerando nas classes apenas a distinção dos tipos de movimentos de massa, sem considerar o grau da suscetibilidade, com as informações do inventário de cicatrizes, ambos na forma de dados matriciais.

O resultado é obtido computando o número de pixels corretamente classificados pelo total da área, equação 12:

$$EG = \frac{nc}{nt} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

nc = corresponde ao número de pixels corretamente classificados;

nt = ao número de pixels total da matriz.

Outra etapa de verificação apoiou-se em um conjunto de 86 pontos de controle de campo, levantados e sistematizados por Geoplanejamento (2011).

2.6. Extrapolação dos resultados obtidos para o mapeamento preliminar da suscetibilidade a movimentos de massa para a BLP

Amparando-se nas experiências, interpretações e na qualidade dos resultados obtidos para a área A, foi

TABELA 1 - CRITÉRIOS ESTABELECIDOS PARA INTEGRAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

Hipsometria		Declividade		Plano de Curvatura	
Abaixo de 20 m	1	Abaixo de 6%	10	Convergente	100
Entre 20 e 40 m	2	Entre 6 e 25%	20	Retilíneo	200
Entre 40 e 400 m	3	Acima de 25%	30	Divergente	300
Acima de 400 m	4				

TABELA 2 - COMBINAÇÕES DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PARA DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA

Suscetibilidade	Processos	Combinação das classes dos atributos topográficos	Integração dos valores
Muito alta	Escorregamentos	- cota altimétrica superior a 400 m; - declividade das vertentes superior a 25%; - segmentos de vertentes divergentes e planares da curvatura em plano.	234, 334
	Escorregamentos/ corridas de detritos	- cota altimétrica superior a 400 m; - declividade das vertentes superior a 25%; - segmentos de vertentes convergentes da curvatura em plano.	134
Alta	Escorregamentos	- cota altimétrica inferior a 400 m; - declividade das vertentes superior a 25%; - segmentos de vertentes divergentes e planares da curvatura em plano.	231, 232, 233, 331, 332, 333
	Corridas de detritos	- declividade das vertentes entre 6 e 25%; - segmentos de vertentes planares ou convergentes da curvatura em plano.	113, 114, 121, 122, 123, 124, 213, 214, 221, 222, 223, 224
	Escorregamentos/ corridas de detritos	- cota altimétrica inferior a 400 m; - declividade das vertentes inferior a 25%; - segmentos de vertentes convergentes da curvatura em plano.	131, 132, 133
	Inundações associada a corridas de lama	- cota altimétrica inferior a 20 m; - declividade das vertentes inferior a 6%; - segmentos de vertentes convergentes da curvatura em plano.	111, 211, 311
Moderada	Escorregamentos e/ou corridas de detritos	- declividade das vertentes entre 6 e 25%; - segmentos de vertentes divergentes da curvatura em plano.	321, 322, 323, 324
		- declividade das vertentes inferiores a 6%; - cota altimétrica acima de 40m; - segmentos de vertentes divergentes da curvatura em plano.	313, 314
	Inundações associadas a corridas de lama	- cota altimétrica entre 20 m e 40 m; - declividade das vertentes inferior a 6%.	112, 212, 312

realizada a extrapolação do método e critérios para a área B, que abrange grande parte da BLP.

Ressalva-se que nem todas as áreas situadas na BLP são condicionadas aos processos avaliados na combinação dos atributos topográficos selecionados, assim optou-se por excluir as áreas que compreendem os ambientes com sedimentos fluviomarinhas, marinhos, cordões litorâneos, manguezais e areias de praia, detectados e extraídos das unidades geológicas da Folha Curitiba, 1:250.000 (MINEROPAR, 2005), também as áreas urbanas, corpos d'água, domínio fitogeográfico das formações pioneiras com influência marinha e

fluviomarinha, obtidas das Cartas de Vegetação, escala 1:25.000 (SEMA, 2001). Desse modo, as áreas excluídas não estão sendo contempladas no mapeamento preliminar da suscetibilidade.

Após a realização da tabulação cruzada e delimitação das classes preliminares de suscetibilidade a movimentos de massa na BLP, foi observada a presença de pequenos agrupamentos de pixels, que na escala de trabalho representam ruídos na imagem. Desse modo, foi estabelecida a aplicação de filtro para a eliminação de agrupamentos com menos de dez células da mesma classe.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A combinação dos atributos topográficos na área da Porção Norte da Serra da Prata (PNSP) resultou no mapa de suscetibilidade natural a movimentos de massa (Figura 11). Nele as classes de muito alta suscetibilidade somam 43,87%, de alta totalizam 42,15% e de moderada 13,98%, organizadas em quatro categorias de processos atuantes: a) escorregamentos, b) corridas de detritos, c) escorregamentos e corridas de detritos e d) inundações associadas a corridas de lama e depósitos. A Tabela 3 apresenta a distribuição em área (km² e %) da ocorrência para cada classe e intensidade.

Um dos mais relevantes atributos topográficos empregados na elaboração do mapa de suscetibilidade da PNSP (Figura 10) foi a declividade, que se mostrou diretamente relacionada aos processos de escorregamento inventariados na imagem de Satélite *Wordview-1*. Na intersecção dos dados verificou-se que 95,51% das áreas de escorregamentos ocorreram em declividades superiores a 25%.

Porém, não foi o único atributo utilizado. Segundo Fernandes *et al.* (2001), a declividade vem sendo utilizada como o principal, ou mesmo o único parâmetro de caráter topográfico incorporado aos estudos de previsão e definição de áreas instáveis gerando, com frequência, distorções na análise dos movimentos de massa. Como consequência dessa interpretação, áreas de menor declividade, inicialmente definidas como de baixa suscetibilidade mostram, com frequência, a presença de cicatrizes no campo, principalmente na forma de corridas de massa.

Assim, outro atributo que apresentou relação com os escorregamentos foi a elevação, sendo que 82,27%

das cicatrizes inventariadas ocorreram nas áreas superiores a 400m. Verificou-se que as cotas acima de 400m nessa região estão associadas aos maciços rochosos mais resistentes, que correspondem a corpos graníticos, cuja intrusão é designada localmente na área como Granito Morro Inglês, segundo mapa geológico na escala 1:10.000 elaborado por Geoplanejamento (2011). Em concordância, essa interpretação é corroborada pela afirmação de Almeida e Carneiro (1998), de que a natureza petrográfica e estrutural dos granitos da Serra do Mar do Paraná os tornam resistentes à erosão e sustentam destacadas elevações.

A elevação também se mostrou diretamente relacionada com as áreas de inundações associadas a corridas de lama, pois 83,3% das ocorrências situam-se nas cotas abaixo de 20m. Por isso esse atributo topográfico foi considerado eficiente.

No que diz respeito à variável plano de curvatura, notou-se grande coincidência com os processos de corridas de detritos inventariados, concentrando-se em 63,3% nas áreas convergentes, visto que esse atributo topográfico está relacionado à dinâmica da água nas vertentes, tanto em fluxos superficiais como subsuperficiais. Seu emprego foi de grande relevância na determinação das classes de suscetibilidade, cujos processos, principalmente as corridas de detritos, estão relacionados diretamente ao transporte em estado de solifluxão, tanto a mobilização do material advindo dos deslizamentos (solo, rocha e árvores), como a remobilização e exumação de depósitos pretéritos.

Cabe destacar que a distinção entre as classes que designam processos de “escorregamentos” e “escorregamentos e corridas”, está associada à morfologia da

TABELA 3 - ÁREA E PERCENTUAL DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE NA PNSP

Suscetibilidade	Processos de movimentos de massa	(km ²)	(%)
Muito Alta	Escorregamentos;	11,45	25,29
	Escorregamentos e corridas de detritos;	8,41	18,57
Alta	Escorregamentos;	8,25	18,22
	Corridas de detritos;	3,88	8,57
	Escorregamentos e corridas de detritos;	5,39	11,90
	Inundações associadas a corridas de lama	1,56	3,45
Moderada	Escorregamentos e/ou corridas de detritos;	5,55	12,26
	Inundações associadas a corridas de lama e depósitos;	0,77	1,71
Total		45,28	100,00

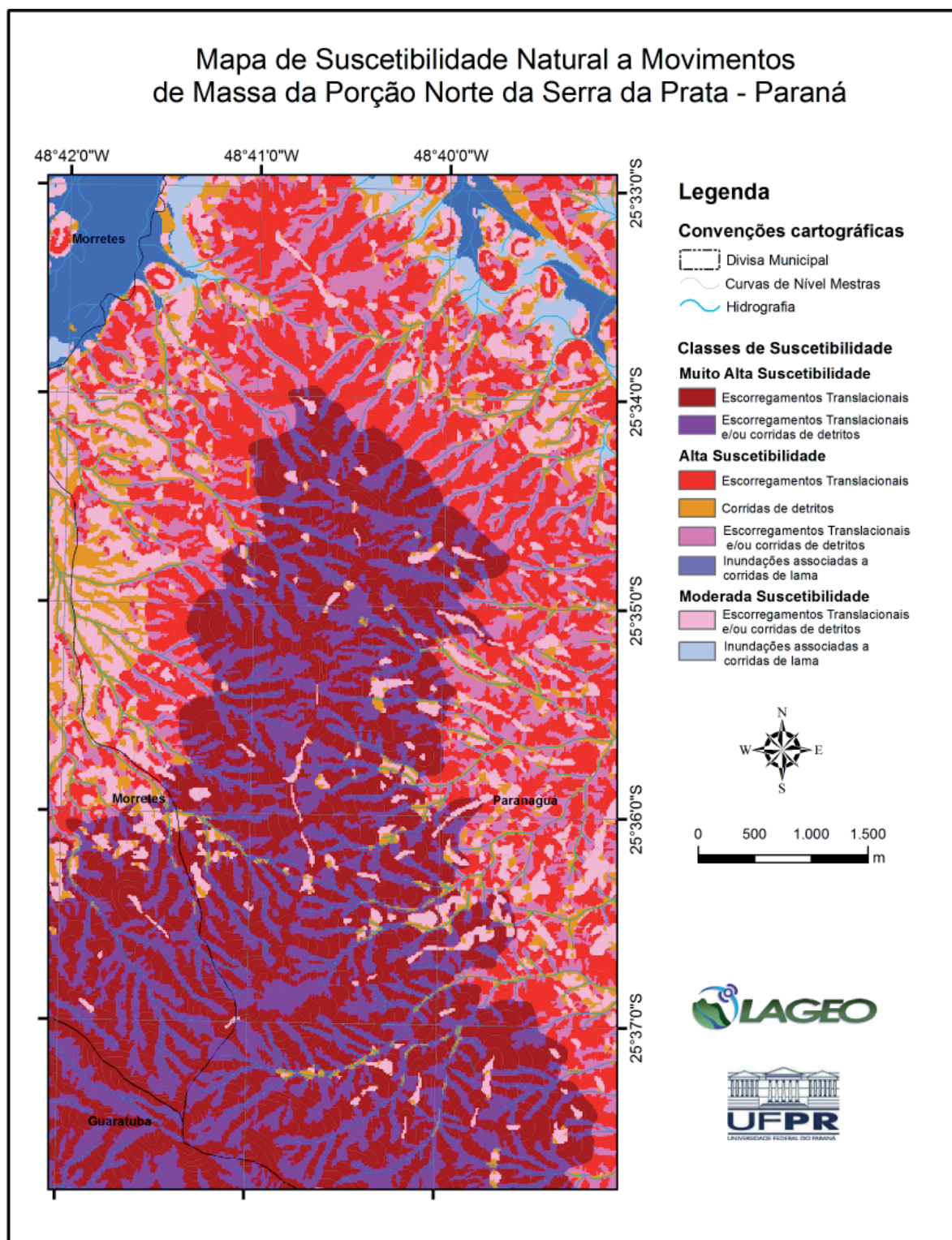


Figura 10 - Mapa de suscetibilidade natural a movimentos de massa da PNSP.

vertente. O que as diferencia é que a segunda classe é composta por vertentes com plano de curvatura convergente, ou seja, vertentes coletoras do fluxo hídrico

superficial e subsuperficial e de materiais, que não só favorecem os escorregamentos por saturação hídrica, como também acumulam material em solifluxão das

corridas. Assim, verificou-se que as áreas situadas nos segmentos de vertentes com convergência de fluxo hídrico potencializam a concentração de água facilitando o desprendimento de material e sua remobilização.

Pozzobon (2013) corrobora com às variáveis empregadas, visto que constatou, por meio de uma abordagem probabilística empregando técnicas de pesos de evidência, que dentre diversas variáveis consideradas, os atributos topográficos de declividade e plano de curvatura foram os que apresentaram melhor relação com deslizamentos no município de Blumenau/PR.

Outros trabalhos também reconhecem que as instabilidades se manifestam preferencialmente em zonas de convergência hídrica, onde o regolito atinge uma máxima espessura, conforme um limite crítico de declividade imposto por relações locais de equilíbrio dinâmico. Nas condições em que houver água suficiente e a topografia favorecer a convergência dos detritos nos canais naturais de escoamento, o material mobilizado poderá originar fluxos de detritos, amplificando seus efeitos diretos e indiretos (CRUDEN e VARNES, 1996; DIKAU, 2004; MATSUSHI *et al.*, 2006; FIORI E CARMIGNANI 2009).

A figura 11 demonstra o resultado do processo de validação das classes de suscetibilidade mapeadas, com base nas cicatrizes inventariadas do evento de 11/03/2011 e num conjunto de pontos de controle de campo. A comparação com o inventário demonstrou 89% de acerto, indicando que as áreas de cicatrizes coincidiram com o mapa de suscetibilidade da PNSP. A outra forma de verificação, apoiada no reconhecimento

de campo, demonstrou que 88% dos 86 pontos com processos identificados *in loco* foram coincidentes com as unidades de suscetibilidade.

Visto os resultados das comparações, verificou-se o potencial de emprego dos atributos topográficos para identificar unidades distintas de formas de relevo que se apresentam favoráveis à ocorrência de processos de movimentos de massa. Desse modo, as formas do relevo, em acordo com MacMillan e Shary (2009), podem ser reconhecidas como objetos naturais que participam a superfície em entidades espaciais fundamentais, resultado cumulativo da influência de processos (geomorfológicos, geológicos, hidrológicos, ecológicos e pedológicos) que atuaram ao longo do tempo.

Apoiado na qualidade dos resultados alcançados na área da PNSP, foi realizada a extrapolação do método e dos critérios para a BLP, situada na mesma região geomorfológica (unidade morfoescultural) da Serra do Mar Paranaense, que resultou no mapa preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da BLP, apresentado de modo reduzido na Figura 12, cujas classes são distribuídas segundo os valores apresentados na Tabela 4.

O conjunto dos mapas finais apresentados na escala 1:50.000 estão disponíveis, de modo integral, no endereço eletrônico: <http://www.lageo.ufpr.br/home2/index.php/publicacoes/mapas>.

Cabe destacar que, devido à maioria dos atributos topográficos variarem em consequência da escala adotada, onde a resolução espacial apresenta uma influência significativa sobre o nível de detalhe e na representação

TABELA 4 – ÁREA DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE PRELIMINAR A MOVIMENTOS DE MASSA NA BLP

Suscetibilidade	Processos de movimentos de massa	(km ²)	(%)
Muito Alta	Escorregamentos;	836,90	18,24
	Escorregamentos e corridas de detritos;	548,00	11,94
Alta	Escorregamentos;	699,90	15,25
	Corridas de detritos;	583,00	12,70
	Escorregamentos e corridas de detritos;	453,30	9,90
	Inundações associadas a corridas de lama	569,60	12,41
Moderada	Escorregamentos e/ou corridas de detritos;	810,90	17,67
	Inundações associadas a corridas de lama e depósitos;	86,00	1,88
Total			100

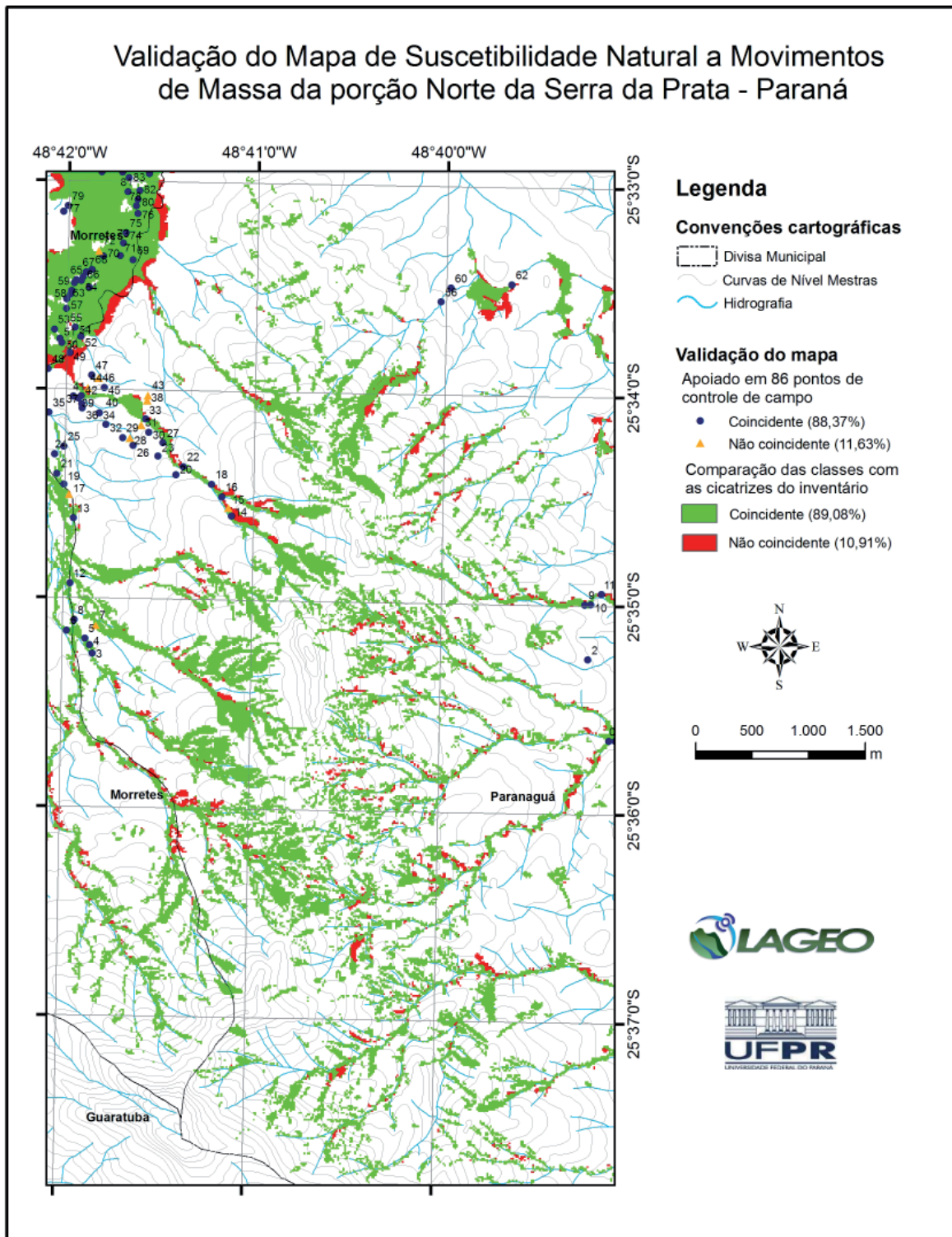


Figura 11 - Comparação da suscetibilidade natural da PNSP com as informações do inventário de cicatrizes e verificação apoiada em pontos de controle de campo.

das características de superfície, ou pela possibilidade de efetuar os calculados por diferentes algoritmos e redes de amostragem, os mapas obtidos a partir de modelos digitais do terreno não podem ser entendidos como

de caráter definitivo (PIKE et al., 2009), mas sim um instrumento de suporte que facilite integração de dados, formulação de modelos preliminares para controle de campo que carecem de validação in loco.

Desse modo, os resultados aqui apresentados não

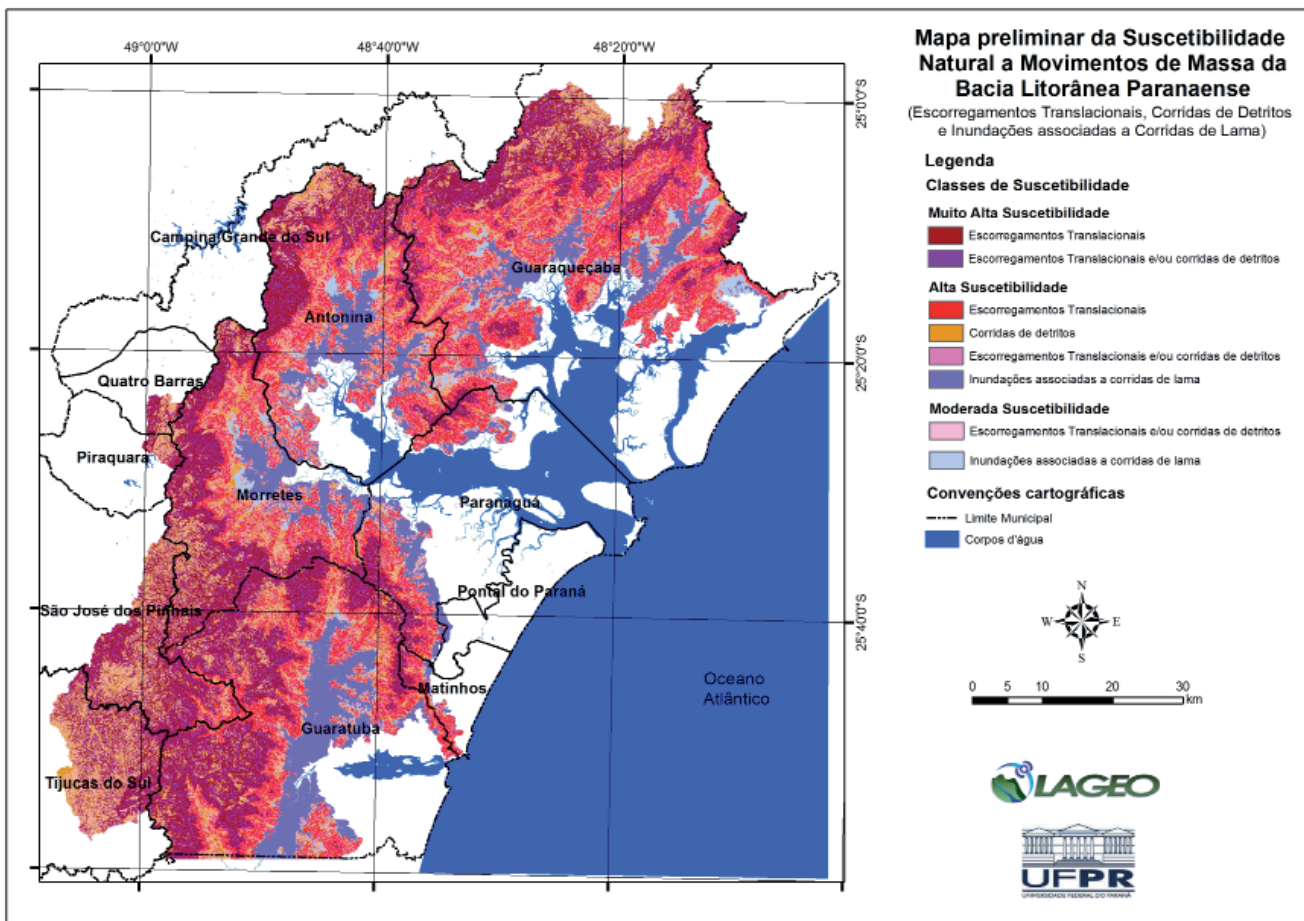


Figura 12 - Mapa preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa na BLP.

são considerados como de um mapeamento final, mas sim um produto de caráter preliminar, que demanda ainda de intenso controle de campo e posterior revisão e/ou reformulação das classes delimitadas.

CONCLUSÕES

Por meio do uso das técnicas de geomorfometria foi reconhecida na PNSP uma estreita relação entre atributos topográficos com as cicatrizes resultantes dos movimentos de massa do evento de 2011. Verificou-se uma relação direta da declividade com os processos de escorregamentos translacionais e corridas de lama associada às áreas de inundação fluvial; do plano de curvatura com as corridas de detritos; e a posição topográfica, expressa pela elevação, com os escorregamentos e corridas de lama associada às inundações.

A combinação dos atributos topográficos de declividade, plano de curvatura e elevação resultou no mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na PNSP,

que comparado ao inventário das cicatrizes mapeadas na data do evento de 11/03/2011, correspondeu a 89% de acerto, demonstrando qualidade satisfatória.

Apoiado nesse experimento foram empregados os mesmos critérios para a área da BLP, resultando no mapa preliminar de suscetibilidade a movimentos de massa. Esse deverá ser submetido a uma fase de controle de campo e validação dos limites predeterminados, estando à mercê de posterior revisão e/ou reformulação.

A técnica empregada, apoiada na análise digital do relevo, demonstrou potencial de aplicação em trabalhos de cartografia da suscetibilidade, principalmente tratando-se da abordagem de movimentos de massa, visto que apresenta um modelo preliminar de ocorrência.

AGRADECIMENTOS

À Mineropar SA., representada no vínculo da pesquisa pelo diretor técnico Marcos Vitor Fabro Dias e geólogo Oscar Salazar. A esses pela oportunidade de

parceria de trabalho, disponibilização de dados e pela concessão de bolsas de estágio para fomentar o desenvolvimento da pesquisa.

Aos demais bolsistas envolvidos nos grupos de trabalho do NUGEO/DeGeol e LAGEO/DeGeog – CT/UFPR.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M.; CARNEIRO, C.D.R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, n.28, v.2, p.135-155, 1998.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1, Rio de Janeiro, 1992. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/PUERJ, v.2, p.721-733, 1992.
- BITAR, O.Y. Instrumentos de gestão ambiental (IGAs) aplicáveis ao planejamento, instalação, operação e desativação de empreendimentos. In: SIMPÓSIO SOBRE GESTÃO AMBIENTAL, 1., **SimGeA 2001**, São Paulo, 2001.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems of land resources assesment**. Francis e Taylor, 185p., 1986.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslides types and processes. In: TURNER, A. K. & SCHUSTER, R. L. (Eds.). **Landslides: investigation and mitigation**. Special Report 247/Trasportation Research Board. Washington: National Academy Press. 1996.
- DIGITALGLOBE. Imagem de satélite *WorldView-1*. Banda pancromática. Resolução espacial de 0,50m no nadir e 0,59m a 25° off nadir. Data de imageamento em 05 de maio de 2011.
- DIKAU, R.. Mass Movement. In: Goudie, A. (Org.). **Encyclopedia of Geomorphology**. Londres: Routledge., p. 644-652, 2004.
- DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO. **Cartas Topográficas**. Folhas: Alexandra, MI 2858-2NO; Paranaguá, MI 2858-2NE; Limeira, MI 2858-2SO; Colônia Pereira, MI 2858-2SE. Escala:1:25.000, coloridas, 1998.
- DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO. **Cartas Topográficas**. Folhas: Bairro do Ariri, MI 2844-2SE; Ilha do Superagui, MI 2844-4NO; Barra do Ararapira, MI 2844-4NE; Jaguatirica, MI 2843-1NE; Ilha Rasa, MI 2844-3NO; Baía de Guaratuba, MI 2858-4NO; Matinhos, MI 2858-4NE; Boa Vista, MI 2858-4SO; Piaçaguera, MI 2844-3SO; Guaraqueçaba, MI 2844-3NE. Escala:1:25.000, coloridas, 2000.
- DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO. **Cartas Topográficas**. Folhas: Rio Itinga, MI 2843-4SE; Represa Guaricana, MI 2858-1SO. Escala:1:25.000, coloridas, 2001.
- DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO. **Cartas Topográficas**. Folhas: Tagaçaba, MI 2844-1SO; Ipanema do Norte, MI 2844-1SE; Batuva, MI 2844-2NO; Rio Verde, MI 2844-2SO; Rio Pequeno, MI 2843-2SO; Potinga, MI 2843-2SE; Rio Cachoeira, MI 2843-4NO; Itaquí, MI 2843-4NE; Estrada da Graciosa, MI 2843-3NO; São Sebastião, MI 2843-2NO; Bairro Rio Pardinho, MI 2843-2NE; Piraquara, MI 2842-4SE; Serra do Marumbi, MI 2843-3SO; Morretes, MI 2843-3SE; Antonina, MI 2843-4SO; Rio Marumbi, MI 2858-1NO; Rio Sagrado, MI 2858-1NE; Colônia Malhada, MI 2857-2SE; Rio Canavieiras, MI 2858-1SE; Tabatinga, MI 2857-4NO; Represa de Voçoroca, MI 2857-4NE; Usina Chaminé, MI 2858-3NO; Cubatão, MI 2858-3NE; Postinho, MI 2857-4SE; Pedra Branca de Araraquara, MI 2858-3SO; Serra Araraquara, MI 2858-3SE. Escala:1:25.000, coloridas, 2002.
- DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO. **Cartas Topográficas**. Folhas: Rio do Nunes, MI 2843-3NE; Rio Açungui, MI 2844-1NO; Serra Negra, MI 2844-1NE; Bairro Alto, MI 2843-1SE. Escala:1:25.000, coloridas, 2003.
- DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO. **Cartas Topográficas**. Folhas: Carta Especial 3, MI 2828-3SE; Carta Especial 2, MI 2828-3SO; Carta Especial 4, MI 2828-4SO. Escala:1:25.000, coloridas, 2004.
- ESRI. **ArcGis, Spatial Analyst, 3D Analyst**. Versão 10. Environmental Systems Research Institute, 2010.
- FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, F.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMETY, D.R.; GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.2, n.1, p.51-71, 2001.
- FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F. GOMES, R.A.T; VIEIRA B.C.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H.M. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidences and modeling. **Catena** (Cremlingen), v. 55, p.163-181, 2004.
- FIORI, A.P. Estudo da estabilidade de vertentes da área de Guaraqueçaba, Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 43, p. 25-40, 1995a.

- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2ª Edição, Editora UFPR: Oficina de Textos, 2009.
- FIORI, A.P.; NUNES, F.G. Áreas de risco e dinâmica geoambiental das encostas da Serra do Mar - PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 53, p. 45-58, 2003.
- GEOPLANEJAMENTO, Pesquisa Mineral e Geologia Ambiental SS Ltda. **Mapeamento Geológico-Geotécnico da Porção Leste da Serra do Mar do Estado do Paraná**, 4 volumes, Curitiba: MINEROPAR S.A., 2011, 91p. Relatório técnico.
- GALLANT, J. C. ; WILSON, J. P. Primary topographic attributes. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). **Terrain Analysis: Principles and applications**. New York: John Wiley, 2000, p.51-85.
- GUIMARÃES, R.F.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H.M.; FERNANDES, N.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v. 69, n. 1-2, p.99-108, 2003.
- HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences**, v. 32, p. 1283-1298, 2006.
- HENGL, T. **Pedometric mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches**. 233p. PhD thesis. Wageningen University, Enschede, Wageningen University, 2003.
- HUTCHINSON, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, n. 106, p. 211-232, 1989.
- HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, n. 69, v. 01, p. 14-47, 1981.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Estação Morretes A873. Coordenadas: 25,5090°S 48,8087°W, altitude 59 m**. 2011.
- KOZCIAK, S. **Análise da estabilidade de vertentes na bacia do rio Marumbi- Serra do Mar - Paraná**. 141p. Tese (Doutorado em Geologia) – Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- MACMILLAN, R.A.; SHARY, P.A. Landforms and Landform Elements In Geomorphometry In: HENGL, T.; REUTER, H. **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Elsevier, v. 33, p.227-254, 2009.
- MATSUSHI, Y.; HATTANJI, T.; MATSUKURA, Y. Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrocks in the Boso Peninsula, Japan. **Geomorphology**, n. 76, p.92-108, 2006.
- MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ S/A. **Mapa Geológico, Folha de Curitiba**. Paraná: MINEROPAR, 2005. Escala: 1:250.000, colorido.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B., LADSON, A. R. Digital terrain modeling: A review of Hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30, 1991.
- MOORE, I. D.; GESSLER, G.A.; PETERSON, G.A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.443-452, 1993.
- PIKE, R.J. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from Digital Elevation Models. **Mathematical Geology**, n. 20, p.491-511, 1988.
- PIKE, R.J.; EVANS, I.S.; HENGL, T. Geomorphometry: A Brief Guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Elsevier, v. 33, p.3-30, 2009.
- POZZOBON, M. **Análise da suscetibilidade a deslizamentos no município de Blumenau/SC: uma abordagem probabilística através da aplicação da técnica pesos de evidência**. 140f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais (Área de concentração: Conservação da Natureza)) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DO PARANÁ (SEMA). **Cartas de Vegetação do Programa Pró-Atlântica**. Paraná: SEMA. 2001. Escala: 1:50.000. Coloridas.
- SHARY, P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. **Mathematical Geology**, v. 27, n. 3, p. 373-390, 1995.
- SILVA, J.P.; SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P. Aplicação de dois métodos físico-matemáticos para avaliação do índice de estabilidade das vertentes da Bacia do Rio Ribeirão – Paranaguá-PR. **Revista Geonorte**, Edição Especial, V.2, N.4, p.1291 - 1302, 2012.
- SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; FERREIRA, M.A.; 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.14, n.1, 2013.
- TABALIPA, N.L. **Mapeamento geoambiental do Município de Pato Branco, Paraná, como ferramenta para o planejamento**

territorial e ambiental. 243p. Tese (Doutorado em Geologia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

TOMLIN, C. D. **A Map Algebra.** In Proceedings of Harvard Computer Graphics Conference, at Cambridge, Mass, 1983.

VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, O, A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v 4, n.1, p.17-29, 2003.

VIEIRA, B.C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar, (SP), a partir de modelos matemáticos em bases físicas.** 193 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N.F.; AUGUSTO FILHO, O. Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo,

Brazil. **Natural Hazards and Earth System Sciences** (Print), v. 10, p. 1829-2010, 2010.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital terrain analysis, chapter 1. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications.** New York: John Wiley & Sons, p.1-27, 2000.

WOOD, J. **The geomorphological characterisation of digital elevation models.** 185p. PhD Thesis. Leicester, UK, - University of Leicester, 1996.

WOOD, J. Visualizing Geomorphometry: Lessons from Information Visualization. **Proceedings of Geomorphometry**, Zurich, Switzerland, p. 9-12, 2009.

ZEVENBERGEN, L.W.; THORNE, C.R. Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 12, p.47-56, 1987.