



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL**

**CLARISSA GUERRA SALVADOR**

**PROPOSTA DE MODELO EMPÍRICO PARA ANÁLISE  
DE SUSCETIBILIDADE A FLUXOS DE DETRITOS COM  
BASE NA CARACTERIZAÇÃO DE CICATRIZES**

**Porto Alegre**

**2022**

**CLARISSA GUERRA SALVADOR**

**PROPOSTA DE MODELO EMPÍRICO PARA ANÁLISE DE  
SUSCETIBILIDADE A FLUXOS DE DETRITOS COM BASE NA  
CARACTERIZAÇÃO DE CICATRIZES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL, DO INSTITUTO  
DE PESQUISAS HIDRÁULICAS DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
DO SUL, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRA EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL.

Orientador: Prof. Dr. Gean Paulo Michel

Porto Alegre

2022

## CIP - Catalogação na Publicação

Salvador, Clarissa Guerra  
PROPOSTA DE MODELO EMPÍRICO PARA ANÁLISE DE  
SUSCETIBILIDADE A FLUXOS DE DETRITOS COM BASE NA  
CARACTERIZAÇÃO DE CICATRIZES / Clarissa Guerra  
Salvador. -- 2022.  
175 f.  
Orientador: Gean Paulo Michel.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Fluxos de detritos canalizados. 2. Fluxos de  
detritos de encosta aberta. 3. Modelagem empírica. 4.  
Fluxos de detritos lenhosos. I. Michel, Gean Paulo,  
orient. II. Título.

**Clarissa Guerra Salvador**

**PROPOSTA DE MODELO EMPÍRICO PARA ANÁLISE DE  
SUSCETIBILIDADE A FLUXOS DE DETRITOS COM BASE NA  
CARACTERIZAÇÃO DE CICATRIZES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos de obtenção do título de Mestra em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Franciele Zanandrea

---

Prof. Dr. Masato Kobiyama

---

Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl

Porto Alegre

2022

*O presente trabalho busca auxiliar na crescente demanda de prevenção de desastres, especialmente associados à ocorrência de fluxos de detritos. Conforme previsto pela Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), Lei 12.608/12, é dever da União, dos Estados e dos Municípios brasileiros identificar e mapear áreas de risco a desastres (BRASIL, 2012), abrangendo principalmente riscos de inundações e de movimentos de massa. A delimitação das áreas de risco apresenta como etapa indispensável a identificação das áreas de maior suscetibilidade. Por conseguinte, levando em consideração a necessidade de mapear diversos municípios do país, esse trabalho propõe uma metodologia simplificada de base empírica, possível de ser aplicada em larga escala, para delimitação de áreas suscetíveis a fluxos de detritos.*

*Neste trabalho, embora escrito na gramática do português, todos os softwares utilizados consideram uma linguagem científica de notação gramatical de ponto para separação decimal. Em vista disso, a fim de uniformizar a interpretação dos valores foi utilizado o ponto como separador decimal.*

## Agradecimentos

Agradeço a Deus acima de tudo.

Agradeço aos meus pais e toda família pela compreensão e paciência ao longo de toda a caminhada, e por aceitarem e sustentarem as minhas escolhas.

Agradeço especialmente ao meu orientador Gean P. Michel por todo apoio e compreensão, pelas pertinentes contribuições e encorajamentos. Mesmo durante a pandemia, sempre esteve disposto em auxiliar no que era necessário e em investir seu tempo, recursos e esforços para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Agradeço a todos os professores com quem mantive contato durante esse período, que durante as disciplinas e mesmo após sempre se mostraram muito disponíveis e interessados em auxiliar no que fosse necessário. Agradeço aos professores e pesquisadores externos ao IPH que tive a oportunidade de conhecer em diferentes ocasiões, e que se mostraram sempre muito interessados em conhecer e contribuir com essa pesquisa.

Agradeço a todos os colegas e amigos que fiz durante esse período, especialmente aos que convivi diariamente nas vindas ao IPH (pré e pós pandemia), mas também as amigadas que surgiram, ou já existiam, e se fortaleceram na minha vida.

Agradeço aos colegas da sala de Hidrologia (e visitantes frequentes) pela recepção e momentos de descontração. Agradeço aos colegas do GPDEN especialmente pela cooperação e parceria em diversas atividades acadêmicas. Agradeço aos colegas de tantos outros grupos, que de alguma forma compartilharam memórias comigo. Agradeço especialmente aos colegas do Hidrosolo por tantas contribuições e discussões científicas e também pessoais. Agradeço a cada um pela convivência, aos que vejo diariamente e aos que acabaram ficando fisicamente distantes, tenho grande carinho e apreço por todos.

Um agradecimento especial ao Noel, Matusalém e Neusa, uma família por quem tenho grande consideração. Agradeço também aos membros do Corpo de Bombeiros, sempre muito receptivos e dispostos em ajudar. E agradeço em geral a toda comunidade dos municípios de Rolante e São Francisco de Paula. A realização deste trabalho só foi possível através do apoio aos projetos pela CAPES e ANA.

E em respeito ao evento ocorrido no ano de 2017, que este trabalho possa colaborar e incentivar os estudos relacionados a fluxo de detritos, com expectativas de prevenir e reduzir os riscos associados a estes desastres.

## RESUMO

Fluxos de detritos são fenômenos complexos e que apresentam elevado potencial destrutivo. A complexidade resultante das variações de composição do fluxo e da sua ocorrência em diferentes morfologias, agregada as altas velocidades e a magnitude do material mobilizado, favorece o reconhecimento do fluxo de detritos como um dos eventos mais perigosos em regiões montanhosas. A demanda por ações de prevenção a esses eventos é crescente, no entanto, vagarosamente preenchida. A aplicação de metodologias complexas que requerem uma grande disponibilidade de dados mostra-se inviável em larga escala, além de demasiadamente onerosa. Em vista disso, o presente trabalho propõe uma abordagem empírica, com a finalidade de subsidiar análises de suscetibilidade a fluxos de detritos. A metodologia consiste inicialmente na caracterização e classificação de cicatrizes ocorridas em uma bacia montanhosa no sul do Brasil, a fim de identificar padrões de propagação e parâmetros empíricos de cada classe de movimento de massa. As cicatrizes foram classificadas entre fluxos de detritos canalizados e de encosta aberta a partir de relações entre comprimento e largura. Considerando a representação de ambas as classes de fluxo de detritos foi proposto um modelo empírico aplicado a partir de ferramentas de geoprocessamento, utilizando algoritmos de direcionamento de fluxo em conjunto com três parâmetros empíricos de calibração: o ângulo de alcance, o limiar de proporção e a profundidade do fluxo de detritos. Para definição desses valores foram usados parâmetros e equações empíricas obtidas a partir da caracterização das cicatrizes e propostas na literatura. Os resultados do modelo proposto obtiveram índices de acerto de até 73% e índice de erro de até 23%, apresentando simulações de propagação com resultados semelhantes aos de um modelo fisicamente embasado simplificado trazido por Paul (2020). A utilização do modelo proposto é recomendada especialmente para estudo preliminar, visando suprir inicialmente essa lacuna quanto à prevenção de desastres em escala nacional.

**Palavras-chave: fluxos de detritos canalizados, fluxos de detritos de encosta aberta, modelagem empírica, fluxo de detritos lenhosos.**

## **ABSTRACT**

### **DEBRIS FLOWS EMPIRICAL ANALYSIS AS A SUBSIDY FOR MODELING SUSCEPTIBLE AREAS**

Debris flow is a complex phenomenon with high destructive potential. The complexity resulting from variations in the material composition and its occurrence in different morphologies, added to the high speeds and magnitude of the mobilized material, results in the recognition of debris flow as one of the most dangerous events in mountainous regions. The demand for actions to prevent these events is growing, however, slowly filled. The application of complex methodologies that require a large availability of data proves to be unfeasible on a national scale, and too expensive. In this view, the present work proposes an empirical approach, in order to support debris flows susceptibility analyzes. The methodology initially consists in the characterization and classification of scars occurred in a mountain basin in southern Brazil, in order to identify propagation patterns and empirical parameters of each movement class. Scars were classified between channeled and open slope debris flows based on length-to-width relationships. Considering the representation of both classes of debris flow, an empirical model was proposed applied from geoprocessing tools, using flow direction algorithms together with three empirical calibration parameters: the angle of reach, the proportion threshold and the depth of debris flow. To define these values, parameters and empirical equations were obtained from literature and from the characterization of scars. The results of the proposed model obtained hit rates of up to 73% and error rates of up to 23%, presenting propagation simulations with results similar to those of a simplified physically based model brought by Paul (2020). The use of the proposed model is recommended especially for a preliminary study, aiming to initially fill this gap in terms of disaster prevention on a national scale.

**Key Words: channelized debris flow, open-slope debris flow, empirical modeling. woody debris flow.**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de Movimento de massa. Adaptado de USGS (2014). .....	28
Figura 2. a. Avalanche de detritos, Itália. (Hungar et al. 2014). b. Fluxo de detritos, Itália, (Takahashi, 2014). .....	34
Figura 3. Classificação conceitual dos movimentos associados a fluxos de detritos. ....	36
Figura 4. Fluxo de detritos com terminologias por trechos. (MICHEL et al., 2021). .....	36
Figura 5. Fluxo de detritos canalizado (Nepal) (HUNGR et al., 2014). .....	39
Figura 6. Fluxos de detritos de encosta aberta. a. Presidente Getúlio, SC em 2020. b. Nova Friburgo, RJ em 2011. ....	39
Figura 7. Esquema ilustrativo do fluxo de detritos. Adaptado de Takahashi (2014). .....	41
Figura 8. a. Fluxo de detritos de encosta aberta. b. Fluxo de detritos canalizado. Adaptado de Nettleton et al., 2005. ....	45
Figura 9. Fluxos de detritos lenhosos. a. Alto Feliz em 2000, RS (Foto cedida por moradores locais) b. Alto Vale do Itajaí em 2020, SC. ....	48
Figura 10. Geometria do fluxo e parâmetros considerados. Adaptado de SCHEIDEGGER (1973) e MORIWAKI (1987) apud KOBAYAMA et al. (2004). ..	51
Figura 11. Representação do volume do fluxo de detritos. Adaptado de JABOYEDOFF et al. (2020). ....	54
Figura 12. Representação de fluxos com alto e baixo FF. Adaptado de SEDEC, 2018. ....	57
Figura 13. Exemplificação de unidades de encosta. (XIAO et al., 2013). .....	62
Figura 14. Relação entre área de contribuição (km <sup>2</sup> ) e declividade em graus (S) dos fluxos de detritos (Adaptado de CHEN et al., 2009). ....	65
Figura 15. Perfis e planos de curvatura da encosta. Adaptado de (Esri, 2022). ....	67
Figura 16. Áreas suscetíveis a fluxos de detritos para o município de Alto Feliz, RS. ....	68
Figura 17. A. Área afetada pelo fluxo de detritos. D. Simulação do modelo proposto por Reid et al. (2016). Adaptado de Reid et al. (2016). ....	72

Figura 18. Condição de confinamento para aplicação do modelo. Adaptado de Facuri e Picanço (2021). .....	73
Figura 19. Localização da bacia do rio Mascarada. ....	75
Figura 20. Trecho de seção do rio Mascarada. ....	76
Figura 21. Mapa de uso e ocupação do solo referente ao ano de 2018. ....	76
Figura 22. Mapas de Declividade (a), Litologia (b) e Solo (c) da bacia do rio Mascarada.....	77
Figura 23. Cicatrizes dos movimentos de massa ocorridos em 2017. ....	78
Figura 24. Fluxograma de etapas da metodologia proposta. ....	80
Figura 25. Medições de largura das cicatrizes. ....	82
Figura 26. Representação das variáveis morfométricas da cicatriz. ....	84
Figura 27. Classificação dos fluxos de detritos múltiplos com base em Horton (1945).....	88
Figura 28. Modelo conceitual do comportamento dos tipos de fluxo de detritos, onde cada curva representa um tipo de propagação de fluxo de detritos. ....	93
Figura 29. Fluxograma das análises univariadas. ....	95
Figura 30. Fluxograma com resumo das análises multivariadas.....	97
Figura 31. Fluxograma de aplicação do modelo de análise de suscetibilidade.98	
Figura 32. Configuração de grid utilizado no método do D-infinito.....	100
Figura 33. Ilustração do processamento pela <i>Distance Down</i> . (Adaptado de Rennó et al., 2008).....	102
Figura 34. Fluxos simulados. (a) Fluxos de detritos de encosta aberta. (b) Fluxo de detritos múltiplo canalizado. (c) e (d) Fluxos de detritos canalizados, calibrados e comparados com modelo fisicamente embasado. ....	105
Figura 35. Cicatrizes mapeadas na bacia do rio Mascarada.....	108
Figura 36. Pontos de medição em campo da largura da cicatriz.....	109
Figura 37. Histogramas de caracterização das Cicatrizes, com sinalização do valor médio de cada parâmetro pela linha tracejada e onde N representa o nº de cicatrizes da amostra. ....	114
Figura 38. <i>Boxplot</i> dos parâmetros de análise morfométrica em função da hierarquia das cicatrizes.....	115
Figura 39. Fluxos de encosta aberta que atingiram o canal.....	117
Figura 40. Histogramas de caracterização dos parâmetros geomorfológicos das Cicatrizes.....	121

Figura 41. <i>Boxplot</i> dos parâmetros de análise geomorfológica da cicatriz.....	122
Figura 42. Máxima declividade em cada trecho da cicatriz. ....	123
Figura 43. Correlação entre todas as variáveis. ....	127
Figura 44. Diagrama da ACP considerando distribuição com os 2 eixos principais. ....	128
Figura 45. Unidades de Encosta geradas na área de incidência de cicatriz, cujos limites são delimitados pelas diferentes cores do mapa. ....	130
Figura 46. Cluster para separação dos tipos de fluxo de detritos, onde cada numeração do eixo das abcissas representa uma única cicatriz.....	131
Figura 47. Cicatrizes da bacia do rio Mascarada classificadas. ....	132
Figura 48. As imagens a. e b., de localização identificada na Figura 47, indicam respectivamente fluxos de detritos de encosta aberta e canalizado. ....	132
Figura 49. Largura máxima por trecho da cicatriz. ....	133
Figura 50. Largura máxima por trecho da cicatriz. ....	134
Figura 51. Largura média de cada trecho da cicatriz. ....	134
Figura 52. Área a montante média por trecho de cicatriz. ....	135
Figura 53. <i>Boxplot</i> dos parâmetros para cada tipo de fluxo de detritos.....	138
Figura 54. Distribuição da área de contribuição e declividade dos trechos de cicatriz. ....	142
Figura 55. Distribuição do ângulo de alcance de cada cicatriz. ....	142
Figura 56. Correlação entre comprimento e largura do fluxo. ....	143
Figura 57. Correlação entre comprimento e área a montante de cada trecho da cicatriz. ....	143
Figura 58. Correlação entre área e largura do fluxo.....	144
Figura 59. Relações entre área do fluxo e volume, conforme equações da literatura. ....	145
Figura 60. Correlação entre o volume estimado e comprimento do fluxo. ....	145
Figura 61. Simulação para os fluxos de detritos de encosta aberta. ....	146
Figura 62. Etapas do modelo. I. Avalanche Runout. II. Distance Down. ....	148
Figura 63. Simulação para os fluxos de detritos canalizados.....	148
Figura 64. Simulação e comparação do modelo proposto e modelo de Paul (2020). ....	150
Figura 65. Aplicação do modelo empírico em toda a bacia do rio Mascarada. ....	152

Figura 66. Rio Mascarada após o desastre de 2017. (Imagem cedida pelo Corpo de bombeiros de Rolante). ..... 154

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação de movimentos do tipo fluxo, proposta por Hungr et al. (2001).....	30
Tabela 2. Valores da literatura de comprimento de fluxos de detritos.....	50
Tabela 3. Valores do ângulo de alcance trazidos para fluxos de detritos.....	52
Tabela 4. Relações empíricas do comprimento em função do volume. ....	53
Tabela 5. Relações empíricas para volume do fluxo de detritos em função da área. ....	55
Tabela 6. Equações de área afetada e seção transversal ( $A_T$ ) em função do volume.....	56
Tabela 7. Larguras média e máxima de fluxos de detritos. ....	59
Tabela 8. Valores sugeridos para a, conforme profundidade. (DU et al., 1987). .....	60
Tabela 9. Relações empíricas para velocidade em função da profundidade do fluxo e declividade. (PROCHASKA et al. 2008). ....	60
Tabela 10. Relações empíricas para velocidade.....	60
Tabela 11. Relações empíricas da vazão de pico ( $Q_p$ ) e volume do fluxo de detritos (V).....	62
Tabela 12. Declividades média, mínima e máxima de 961 fluxos de detritos de encosta aberta. (LORENTE et al., 2003).....	64
Tabela 13. Características estimadas para cada cicatriz. ....	85
Tabela 14. Parâmetros considerados para geração das SU.....	92
Tabela 15. Valores considerados para equação de profundidade do fluxo....	107
Tabela 16. Larguras medidas em campo e na imagem por geoprocessamento. .....	110
Tabela 17. Caracterização geral das cicatrizes de cada ordem.....	111
Tabela 18. Índices morfométricos das cicatrizes.....	112
Tabela 19. <i>Loadings</i> da cada componente principal da análise.....	129
Tabela 20. Parâmetros analisados quanto as cicatrizes classificadas por SU. .....	130
Tabela 21. Estatística do valor do expoente da equação de regressão .....	131
Tabela 22. Parâmetros para cada classe dos tipos de fluxos de detritos.....	139
Tabela 23. Dados de entrada para obtenção da profundidade do fluxo (h). ..	147

Tabela 24. Índices de acerto e de erro para cada etapa do modelo. ....	149
Tabela 25. Parâmetros utilizados em cada fluxo. ....	150
Tabela 26. Índices de Acerto e de erro para o modelo proposto e modelo de Paul (2020).....	151

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área afetada pelo fluxo de detritos	$m^2$
$A_c$	Área de contribuição	$m^2$
$A_b$	Área da bacia hidrográfica	$m^2$
$A_T$	Área da seção transversal	$m^2$
$areamin$	Área mínima para definição das SU	$m^2$
$\theta$	Ângulo da encosta no trecho de propagação do fluxo de detrito	$^\circ$
$\omega$	Ângulo de orientação do vetor do direcionamento de fluxo	$^\circ$
$\alpha$	Ângulo de alcance	$m$
$g$	Aceleração da gravidade	$m/s^2$
$f$	Coefficiente de atrito	-
$a$	Coefficiente de calibração	-
$b$	Coefficiente de calibração	-
$c$	Coefficiente de calibração	-
$\varphi$	Coefficiente de calibração	-
$\beta$	Coefficiente de calibração	-
$\phi$	Parâmetro de calibração	-
$K_c$	Coefficiente de compacidade	-
$n$	Coefficiente de rugosidade de manning	-
$L$	Comprimento do fluxo de detritos	$m$
$L_t$	Comprimento de todos fluxos de detritos	$m$
$L_m$	Comprimento médio dos fluxos de detritos	$m$
$S$	Declividade do canal de drenagem	$m/m$
$s$	Deslocamento da massa de fluxo	$m$
$D_d$	Densidade de Drenagem	$m^{-1}$
$X$	Distância horizontal percorrida pelo fluxo de detritos	$m$
$H$	Desnível entre o ponto inicial e final do fluxo de detritos	$m$
$Eps$	Extensão do Percurso Superficial	$m$
$FF$	Fator de forma	-

$rf$	Fator de redução para SU	-
IA	Índice de acerto	-
IE	Índice de erro	-
F	Percentual de fluxo em cada célula	-
$w$	Largura do fluxo de detritos	m
UBV	Limite superior do boxplot	-
LBV	Limite inferior do boxplot	-
$tresh$	Limiar de acumulação para SU	m <sup>2</sup>
$\rho$	Massa específica	Kg/m <sup>3</sup>
$m$	Massa de material deslocado	Kg
N	Número amostral	-
P	Perímetro do fluxo de detritos	m
H	Profundidade do fluxo de detritos	m
$R_b$	Relação de Bifurcação	-
$RL_m$	Relação de Comprimento	-
$R_g$	Relação de Gradiente	-
$x$	Valor amostral	-
$z$	Valor normalizado	-
$cvmin$	Variância circular para SU	-
$Q$	Vazão do fluxo de detritos	m <sup>3</sup> /s
$Q_p$	Vazão de pico do fluxo de detritos	m <sup>3</sup> /s
$v$	Velocidade média do fluxo de detritos	m/s
$\mu$	Viscosidade dinâmica	Kgf.s/m <sup>2</sup>
$V_D$	Volume da área de iniciação	m <sup>3</sup>
$V$	Volume do fluxo de detritos	m <sup>3</sup>
$V_w$	Volume de água	m <sup>3</sup>



## LISTA DE ABREVIACOES

APP – rea de Preservação Permanente

AR – *D-infinity Avalanche Runout*

COBRADE – Classificação e Codificação Brasileira de Desastres

CPRM – Servio Geológico Brasileiro

DD – *D-infinity Distance Down*

DRH – Departamento de Recursos Hídricos

GPDEN – Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais

HAND – *Height above nearest drainage*

IA – ndice de Acerto

IE – ndice de Erro

PNPDEC – Política Nacional de Proteção e Defesa Civil

SEMA – Secretaria Estadual do Meio Ambiente

TauDEM – *Terrain Analysis using Digital Elevation Models*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	21
2. OBJETIVOS.....	25
2.1. Objetivo Geral .....	25
2.2. Objetivos Específicos .....	25
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	26
3.1. Movimentos de Massa .....	26
3.1.1. Escorregamentos.....	29
3.1.2. Fluxos .....	30
3.2. Fluxos de detritos .....	31
3.2.1. Mecanismo de propagação: Fluxo, Avalanche e Inundação de Detritos	32
3.2.2. Fluxos de Detritos Canalizados e de Encosta Aberta.....	37
3.2.3. Etapas de Formação do Fluxo de Detritos .....	40
3.2.3.1. Origem do Fluxo.....	41
3.2.3.2. Zona de Transporte.....	42
3.2.3.3. Zona de Deposição .....	44
3.2.4. Composição dos Fluxos de Detritos .....	46
3.3. Características dos Fluxos de Detritos.....	48
3.3.1. Análises Morfométricas e do Fluxo.....	49
3.3.1.1. Alcance do escoamento .....	49
3.3.1.2. Volume do Fluxo de Detritos .....	53
3.3.1.3. Área do Fluxo de Detritos.....	55
3.3.1.4. Profundidade.....	58
3.3.1.5. Largura do Fluxo de Detritos.....	58
3.3.1.6. Velocidade .....	59
3.3.1.7. Vazão de Pico.....	61
3.3.2. Análises Geomorfológicas .....	62
3.3.2.1. Unidades de Encosta .....	62

3.3.2.2.	Declividade.....	64
3.3.2.3.	Elevação e Orientação.....	65
3.3.2.4.	Curvatura.....	66
3.4.	Suscetibilidade a Fluxos de Detritos.....	67
3.4.1.	Modelos Fisicamente Embasados.....	69
3.4.2.	Modelos Empíricos.....	70
3.5.	Síntese da Revisão.....	73
4.	ÁREA DE ESTUDO.....	75
4.1.	Bacia do Rio Mascarada.....	75
4.2.	Estudos desenvolvidos na bacia do rio Mascarada.....	78
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	80
5.1.	Caracterização das Cicatrizes.....	81
5.1.1.	Delimitação das Cicatrizes.....	82
5.1.2.	Análises Morfométricas.....	83
5.1.3.	Análises Geomorfológicas.....	84
5.2.	Classificações.....	86
5.2.1.	Classificação pela Hierarquia de Fluxos de Detritos.....	87
5.2.2.	Grau de Desenvolvimento.....	89
5.2.3.	Classificação dos Tipos de Fluxo de Detritos quanto ao Grau de Confinamento.....	91
5.2.3.1.	Classificação com base nas Unidades de Encosta (SU).....	91
5.2.3.2.	Classificação proposta com base na Morfometria da Cicatriz.....	92
5.3.	Análises Estatísticas.....	94
5.3.1.	Análise Univariada.....	95
5.3.2.	Análise Multivariada.....	96
5.4.	Modelo de Suscetibilidade a Fluxos de Detritos.....	97
5.4.1.	Avalanche Runout.....	99
5.4.2.	Direção de Fluxo D-infinito.....	99
5.4.3.	Distance Down.....	100

5.4.4.	Parâmetros de Calibração .....	102
5.5.	Aplicação e Desempenho do Modelo .....	104
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	108
6.1.	Caracterização das Cicatrizes.....	108
6.1.1.	Índices morfométricos com base na Hierarquia das Cicatrizes ..	110
6.1.2.	Análises Morfométricas .....	113
6.1.3.	Análises Geomorfológicas .....	118
6.1.4.	Correlações .....	125
6.1.5.	Análise de Componentes Principais .....	128
6.2.	Classificações quanto ao grau de confinamento .....	129
6.2.1.	Classificação com base nas SU .....	129
6.2.2.	Classificação Proposta com base na Propagação do Fluxo de Detritos	131
6.2.2.1.	Propagação dos Fluxos de Detritos .....	133
6.2.2.2.	Caracterização de Fluxos de Detritos Canalizados e de Encosta Aberta .....	136
6.3.	Relações Empíricas .....	142
6.4.	Modelo Empírico com Geoprocessamento .....	145
6.4.1.	Fluxo de Detritos de Encosta Aberta .....	145
6.4.2.	Fluxo de Detritos Múltiplo Canalizado .....	147
6.4.3.	Fluxos de Detritos Individuais Canalizados .....	150
6.4.4.	Fluxos de Detritos na Bacia do Rio Mascarada .....	152
6.5.	Desafios, Limitações e Incertezas.....	154
7.	RECOMENDAÇÕES .....	156
8.	CONCLUSÕES .....	157

## 1. INTRODUÇÃO

Fluxos gravitacionais que ocorrem em áreas montanhosas, como os fluxos de detritos, são fenômenos complexos e perigosos (PERUZZETTO et al. 2019). Em virtude da complexidade do movimento e da afinidade com outros processos hidrogeomorfológicos, existem algumas incompatibilidades de definições e nomenclaturas. O termo fluxo de detritos é descrito como um fluxo rápido descendente de uma mistura de detritos e água (BALLANTYNE, 2004). No entanto, grande parte das referências descreve os fluxos de detritos como um movimento rápido inserido em um canal de drenagem (HAAS et al., 2018; HUNGR et al. 2014; IMAIZUMI et al. 2006), apesar de sua ocorrência também afetar áreas de encosta aberta, sem manifestação de vertentes encaixadas.

Hurlimann et al. (2015) e Davies et al. (2013) apontam que os fluxos de detritos são mais comumente estudados em canais do que em encostas. Apesar disso, Lorente et al. (2003) aponta que fluxos de detritos em encostas abertas são um dos processos geomorfológicos mais ativos em regiões montanhosas. A nomenclatura que diferencia esses dois tipos de movimentos classifica como fluxos de detritos canalizados, chamados *valley-confined* ou *channelized debris flow*, e os fluxos de detritos de encosta aberta, descritos como *open slope* ou *hillslope debris flow*. Embora classificados no mesmo grupo, as condições de propagação e comportamento do fluxo resultam em diferentes implicações que refletem a necessidade de abordagens individuais especialmente para análises de suscetibilidade.

A complexidade dos fluxos de detritos resulta, além de outros fatores, do tipo de propagação do movimento e da variabilidade de material envolvido. Entre as variações de material são destacados os fluxos de detritos lenhosos, referenciados como *woody debris flow*, característicos de regiões tropicais e áreas florestadas. A presença de troncos e material lenhoso, devido ao seu formato irregular que pode ficar retido em algum obstáculo durante o percurso, gera alterações no regime do fluxo (TSUNETAKA et al., 2021). Por conseguinte, análises de caracterização e a descrição de eventos ocorridos em áreas florestadas diferem de regiões montanhosas sem vegetação.

A principal origem dos fluxos de detritos está associada aos escorregamentos translacionais desencadeados por eventos extremos de precipitação (IVERSON et

al., 1997), especialmente dos fluxos de detritos ocorridos no Brasil. Análises de suscetibilidade a fluxos de detritos permitem utilizar diversas abordagens de definição das áreas de origem, a partir de modelos que indicam áreas de maior propensão a escorregamentos translacionais. Análises de caracterização e metodologias de análise de estabilidade de encosta são mais bem consolidadas na literatura com modelos amplamente difundidos para escorregamentos translacionais como TRIGRS (BAUM et al. 2002), SHALSTAB (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994), SINMAP (PACK et al., 1998), entre outros. Por sua vez, os processos e mecanismos de transformação dos escorregamentos translacionais em fluxos de detritos são pouco estudados e compreendidos (CAREY et al., 2021; GABET et al., 2006; ELLEN e FLEMING, 1987), como também estudos da própria caracterização e propagação de diferentes tipos desse movimento. A composição de materiais envolvidos, as condições de confinamento da encosta e a morfologia da região interferem na ocorrência dos fluxos de detritos e conseqüentemente no desempenho de análises de suscetibilidade ao movimento.

A caracterização de fluxos de detritos e obtenção de relações empíricas entre suas variáveis descreve a base de reconhecimento e compreensão do fenômeno. As análises empíricas são praticamente uma condição intrínseca à evolução da concepção de um processo hidrogeomorfológico. A elevada complexidade do movimento reflete na amplitude de busca da sua compreensão através de abordagens empíricas que datam desde Heim (1932) até estudos mais recentes (ZHOU et al., 2019; LIMA et al. 2020). Fannin e Wise (2001) ressaltam que em muitas situações onde a compreensão das propriedades do material é limitada e o percurso do fluxo de detritos é controlado por mudanças súbitas no terreno, métodos empíricos oferecem uma abordagem prática para prever o comportamento do movimento.

A aplicação conjunta da modelagem empírica com ferramentas de geoprocessamento proporciona uma abordagem ainda mais promissora. No âmbito de riscos à inundação, a criação do modelo HAND (RENNÓ et al., 2008) representou uma relevante contribuição na tentativa de preencher a demanda por metodologias efetivas e viáveis de aplicação, trazendo bons resultados em comparação a modelos de elevada complexidade (AFSHARI et al., 2018; MONTE et al. 2019). Ainda assim, o modelo apresenta algumas limitações quando aplicado em regiões mais planas em comparação com áreas de maior declividade.

Tesfa et al. (2011) propuseram uma ferramenta com o mesmo princípio do modelo HAND, porém permitindo variar os métodos de medição das distâncias, também utilizado em análises de suscetibilidade à inundação (ZHENG et al., 2019; LIU et al., 2016). Da mesma forma, modelos empíricos em conjunto com geoprocessamento que buscam abordagens de maior praticidade também são aplicados para análise de suscetibilidade a fluxo de detritos (PARK et al., 2016; PASTORELLO et al., 2017; KANG e LEE, 2018), no entanto a diferenciação e especificações dos tipos de fluxos de detritos dificilmente é considerada.

O histórico de desastres no Brasil, associados especialmente a grande impacto socioeconômico, envolvem a ocorrência de fluxos de detritos. Kobiyama e Michel (2014) trazem um histórico de ocorrência de fluxos de detritos ocorridos no Brasil. Eventos de grande magnitude, que recentemente afetaram localidades do país, ocorreram na região serrana do Rio de Janeiro, em especial nos anos 2011 e 2022, e na região do Alto Vale do Itajaí, particularmente em 2008 (GOERL et al. 2009; KOBİYAMA et al., 2010), 2011 (ROCHA, 2011) e 2020 (MICHEL et al., 2021). A área de ocorrência dos movimentos de massa, com zonas de passagem próximas a áreas de ocupação, resultou em grande número de fatalidades.

Em 2017, o evento ocorrido nas áreas de cabeceira do rio dos Sinos (CARDOZO et al., 2021), na bacia do rio Mascarada, sobre os municípios de Rolante e São Francisco de Paula (RS), embora de grande magnitude, não ocasionou mortes justamente pela sua deflagração em áreas de menor concentração populacional. No entanto, a taxa de recorrência desses eventos agregado a questão de crescimento populacional e consequente ocupação de áreas de risco, manifesta a necessidade e relevância em desenvolver análises de suscetibilidade a fluxos de detritos.

Kobiyama e Michel (2014) apontam existir uma subjetividade na definição, identificação e descrição de fluxos de detritos, e ainda que os fluxos de detritos no Brasil possivelmente diferem de fluxos que ocorrem no exterior. Por conseguinte, a discussão quanto à terminologia e conceituação dos fluxos de detritos e processos hidrogeomorfológicos associados, bem como metodologias quantitativas que buscam descrever a morfometria e geomorfologia do movimento, podem trazer grande avanço na compreensão e modelagem do fenômeno. Ademais, análises direcionadas para fluxos de detritos lenhosos, subdivididos entre canalizados e de encosta aberta, podem auxiliar no aperfeiçoamento de metodologias de análise de

suscetibilidade simplificadas, importantes para regiões propensas a esse tipo de movimento, como no Brasil.

Em função da crescente demanda de prevenção a desastres agregada a baixa disponibilidade de recursos e informações, é evidente a necessidade do desenvolvimento de metodologias capazes de suprir essa lacuna. Nesse sentido, o presente trabalho propõe um modelo empírico de análise de suscetibilidade a fluxo de detritos, utilizando como subsídio a caracterização e a classificação de fluxos de detritos ocorridos em uma bacia florestada no sul do Brasil.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Propor modelo empírico para análise de suscetibilidade a fluxos de detritos.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar os fluxos de detritos ocorridos na bacia do rio Mascarada;
- Identificar padrões de ocorrência a partir da correlação entre os parâmetros morfométricos e geomorfológicos de fluxos de detritos, propondo relações empíricas entre eles;
- Classificar dos fluxos de detritos já ocorridos quanto à hierarquia de cicatrizes, grau de desenvolvimento e grau de confinamento;
- Estabelecer relações empíricas para ajuste dos parâmetros do modelo proposto;
- Comparar resultados do modelo proposto com os resultados obtidos por um modelo fisicamente embasado.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Movimentos de massa são descritos como processos de movimentação de material do solo através da força da gravidade. Os movimentos de massa podem ser classificados em diversas nomenclaturas a fim de enfatizar particularidades específicas mais relevantes para uma determinada aplicação. Entre eles, inserido na classificação de fluxos, os fluxos de detritos são considerados um dos mais perigosos movimentos de massa (ALEXANDER, 1989). Por ser um movimento extremamente complexo, existem diferentes conceitos e definições do termo, incluindo algumas variações e sobreposições de nomenclatura. Além do termo fluxo de detritos, as terminologias inundação de detritos e avalanche de detritos também são frequentemente associadas aos movimentos que envolvem esse material. Classificações quanto ao tipo de fluxo, que divergem quanto ao grau de confinamento também permitem uma melhor compreensão e representação desse fenômeno.

As diferenças de clima, topografia, hidrologia e sedimentologia influenciam quais sub tipos de fluxos de detritos são mais ativos, e essas variações podem ser detectadas da morfologia resultante (RUBENSDOTTER et al., 2021). O conjunto de análises morfométricas e geomorfológicas de um fenômeno permite identificar padrões e relações empíricas que possibilitam representar de forma simplificada o comportamento do fluxo. Essas representações em conjunto com bases de geoprocessamento constituem modelos de análise de suscetibilidade, necessários para os mapeamentos de risco a fluxos de detritos. Dessa forma, a presente revisão bibliográfica buscou elucidar as principais diferenciações entre movimentos envolvendo detritos, e caracterizar os fluxos de detritos, em função da sua relevância como processo sócio-hidrogeomorfológico, introduzindo algumas metodologias usadas para análise de suscetibilidade a esse movimento.

#### **3.1. Movimentos de Massa**

De acordo com Regmi et al. (2015) os movimentos de massa são o resultado de uma variedade de fatores geomorfológicos, geológicos e hidrológicos que predispõe uma encosta à instabilidade, sendo considerados como rupturas que ocorrem em encostas inclinadas (GUO et al., 2019). Zererê (2005) ainda define como o

movimento descendente de material das encostas associado á dinâmica da água, com influência direta da gravidade, e podendo ter como agente catalisador as intervenções antrópicas. Esses movimentos são responsáveis pela evolução da paisagem e pela dinâmica de sedimentos. Em geral, são movimentos que envolvem grandes quantidades de material e ocorrem periodicamente, sendo associados a eventos extremos. Hungr et al. (2014) indicam que grande parte dos movimentos de massa gera episódios separados por períodos relativamente quiescentes, ou entre períodos de repouso, o que dificulta a determinação exata de sua ocorrência. Além disso, a magnitude desses fenômenos é inversamente proporcional a sua frequência, variando conforme as condições de cada região e sofrendo diretamente com eventos de variação climática e alterações antrópicas (JACKSON, 2013), de forma que eventos de maior magnitude ocorram em intervalos de tempo mais longos, gerando muitas vezes o esquecimento ou a falsa ideia de segurança pela comunidade local.

A ocorrência de movimentos de massa em áreas de ocupação pelo homem resulta em potenciais danos materiais, sociais e ambientais que quando ultrapassam a capacidade de recuperação e resposta da população são descritos como desastres. Entre as diferentes causas de desastre no Brasil, os movimentos de massa resultaram no segundo maior número de óbitos entre 1991 e 2012 (CEPED/UFSC, 2012). Logo, o reconhecimento desses fenômenos, bem como o estabelecimento de conceitos e terminologias, é de extrema importância para avançar o desenvolvimento de mecanismos para redução dos impactos e consequências ocasionados por esses eventos.

Classificar movimentos de massa é o primeiro passo entre as etapas de prevenção de desastre, garantindo maior entendimento e diferenciação de eventos. Entre as nomenclaturas de classificação mais utilizadas está a classificação feita por Varnes (1978), baseada em Sharpe (1938), a qual utiliza uma série de atributos como a geometria do terreno na área de falha e depósito, o tipo de movimento e material envolvido, a taxa de movimentação ou velocidade de deslocamento, causas da falha e grau de desenvolvimento. A partir dessas características fundamentais observadas, Varnes (1978) estipulou cinco principais tipos de movimento de massa: queda (*falls*), tombamento (*topless*), escorregamento (*slides*), divididos entre rotacional e translacional, espalhamento (*spreads*) e fluxo (*flows*) (Figura 1).

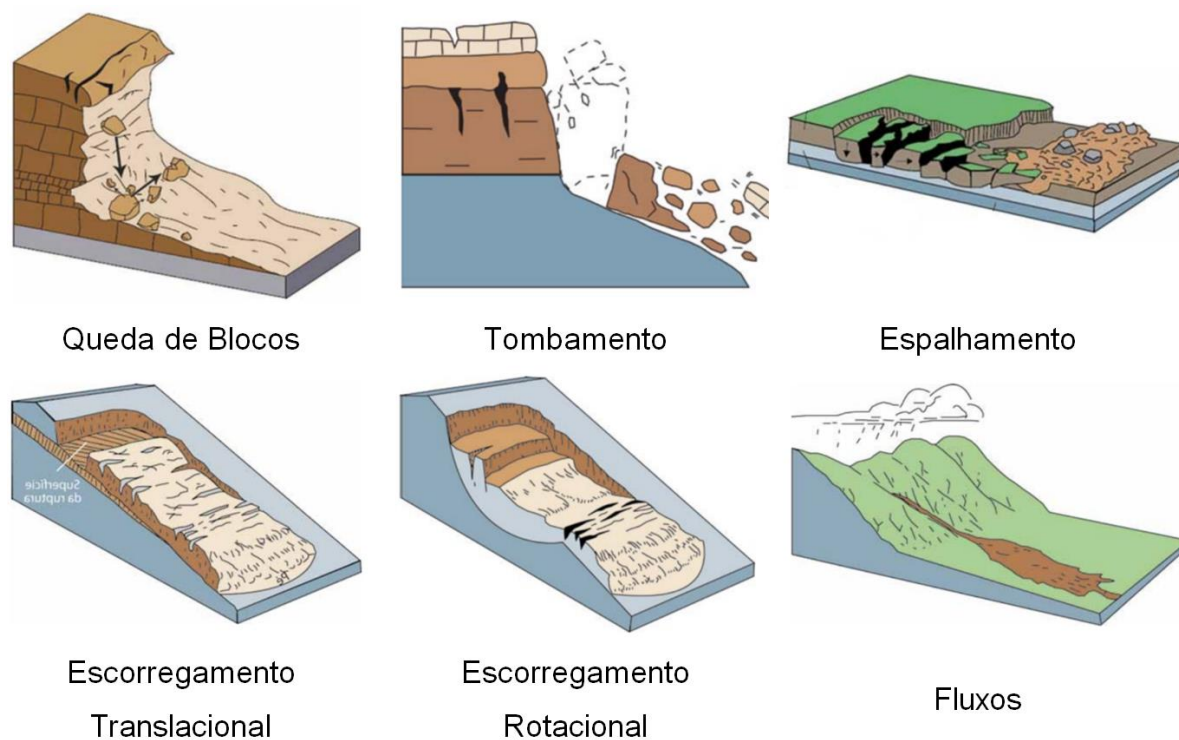


Figura 1. Tipos de Movimento de massa. Adaptado de USGS (2014).

Ainda uma sexta classe abrange os movimentos chamados complexos, que se caracterizam pela junção de dois ou mais tipos de movimentos de massa. Contudo, a classificação atualizada trazida por Hungr et al. (2014) não considera esses movimentos complexos como uma única classe, visto que abrangem amplas possibilidades de variação, além de que praticamente todos os movimentos já estão associados à uma complexidade até certo grau. As condições de ocorrência e as regiões em que geralmente incidem os movimentos de massa são muito semelhantes, de forma que sua ocorrência conjunta e interligada é bastante frequente. Em vista disso, nem sempre é possível identificar de maneira clara e objetiva cada movimento de massa, resultando em classificações flexíveis o suficiente para que cada pesquisador associe o movimento a uma terminologia, ou composição de termos, que melhor reflita o seu interesse. Não obstante, a necessidade de terminologias e conceitos padronizados baseados em um maior número de observações e dados de campo é essencial para o melhor desenvolvimento e desempenho de ações de gestão de risco aos desastres vinculados a esse tipo de evento.

### 3.1.1. Escorregamentos

A classe de escorregamentos translacionais ou rasos é definida como um dos perigos mais abundantes em áreas montanhosas, sendo os escorregamentos iniciados por precipitação os de maior recorrência (BOGAARD e GRECO, 2018). Os escorregamentos ocorrem quando as tensões de cisalhamento na encosta excedem as forças de resistência da camada de solo, iniciando um movimento descendente do material. Hurlimann et al. (2015) classificam os escorregamentos ocorridos nas encostas em três grupos: i) escorregamentos não transformados em fluxos, ii) escorregamentos parcialmente transformados em fluxos e iii) escorregamentos completamente transformados em fluxos. Os escorregamentos não transformados e parcialmente transformados percorrem distâncias curtas, influenciados pela morfologia da encosta, disponibilidade de material e pelo nível de fluidificação da mistura. Já os escorregamentos completamente transformados possuem grande mobilidade, percorrendo longas distâncias, sendo classificados propriamente como fluxos.

Analogamente a classificação trazida por Hurlimann et al. (2015), o termo desenvolvido pode ser utilizado em relação a classe dos fluxos. Assim, escorregamentos não transformados são considerados como fluxos não desenvolvidos; os escorregamentos parcialmente transformados, os quais apresentam um trajeto interrompido por condições do terreno como estruturas de contenção ou vales muito encaixados sem uma redução gradual da declividade que possibilitasse um total espalhamento da zona de deposição, como fluxos de detritos parcialmente desenvolvidos; e os escorregamentos completamente transformados, que apresentam uma zona de deposição bem estabelecida, como fluxos de detritos completamente desenvolvidos. Takahashi (2014) utiliza o termo completamente desenvolvido para descrever fluxos que tem seu crescimento limitado por não mais apresentar capacidade de erosão do leito.

Embora fluxos e escorregamentos estejam classificados em diferentes grupos, e da mesma forma apresentem diferentes métodos de predição, a principal forma de ocorrência dos fluxos de detritos é a partir da evolução dos escorregamentos. A classificação de cada movimento é difícil de ser determinada, e a própria zona de transição dessa cadeia de processos não é bem estabelecida. Em vista disso, é necessário considerar a correlação entre os movimentos a fim de representar

verdadeiramente o risco causado por essa cadeia de desastres (ZHOU et al., 2022), no entanto precisam ser abordados separadamente a fim de identificar padrões e características de cada uma das classes.

### 3.1.2. Fluxos

Os movimentos de massa classificados como fluxos são considerados os mais perigosos em função da maior capacidade de causar danos (HUNGR, 1995). O fluxo é um movimento contínuo no qual as superfícies de cisalhamento geralmente não são preservadas, e a distribuição de velocidades na massa deslocada assemelha-se a propagação de um líquido viscoso (CRUDEN e VARNES, 1996). Entre as classes de movimentos de massa os fluxos apresentam a maior variação de terminologia, justamente por apresentarem diferentes variações significativas dentro do mesmo grupo. Assim, além da classificação trazida por Varnes (1978), Hungr et al. (2001) contribuíram atualizando a classificação com o propósito de refletir os avanços e entendimentos desses movimentos, principalmente em relação aos materiais e mecanismos envolvidos.

A Tabela 1 traz a classificação atualizada que manteve as principais classes de Varnes (1978): fluxo de detritos, avalanche de detritos, fluxo de terra e fluxo rápido de terra que passou a ser chamado fluxo de lama. Outra alteração importante foi a inclusão do termo inundação de detritos e a substituição do termo “fluxo rápido” por fluxo de deslizamento. Entre os tipos de fluxo Hungr et al. (2014) apontaram o fluxo de detritos como particularmente importante em ambientes montanhosos.

Tabela 1. Classificação de movimentos do tipo fluxo, proposta por Hungr et al. (2001).

<b>Classificação</b>	<b>Definição simplificada</b>
Avalanche de rochas	Fluxo extremamente rápido e massivo de rochas fragmentadas.
Avalanche de detritos	Fluxo raso muito rápido a extremamente rápido de detritos completamente ou parcialmente saturados, sem confinamento em um canal.
Inundação de	Onda de fluxo muito rápido de água

detritos	fortemente carregada com detritos em um canal declivoso.
Fluxo de lama	Fluxo muito rápido a extremamente rápido de detritos plásticos saturados em um canal, envolvendo maior quantidade de água em relação ao material de origem.
Fluxo de detritos	Fluxo muito rápido a extremamente rápido de detritos não plásticos saturados em um canal declivoso.
Fluxo de terra	Fluxo rápido ou mais lento, intermitente, de terra plástica argilosa.
Fluxo de turfa	Fluxo lento a muito rápido de turfa saturada, envolvendo elevada poro-pressão.
Fluxo de deslizamento de argila	Fluxo muito rápido a extremamente rápido de argila liquefeita, próximo ou no seu teor de água de origem.
Fluxo de deslizamento de areia	Fluxo muito rápido a extremamente rápido de material granular, envolvendo excesso de poro-pressão.
Fluxo de areia não-liquefeito	Fluxo de material granular solto, seco ou úmido, sem significativo excesso de poro-pressão.

### 3.2. Fluxos de detritos

O fluxo de detritos é um dos movimentos de massa mais perigosos, caracterizado por atingir altas velocidades, percorrer longas distâncias, dispor de grande força de impacto e ter baixa previsão temporal (JAKOB e HUNGR, 2005). É um fenômeno de elevada complexidade e difícil observação e medição em campo. Embora já se tenha registro de eventos em vídeo desde a publicação de Okuda et al. (1977), e até experimentos físicos em larga escala (IVERSON et al. 1992;

MAJOR, 1997; IVERSON et al., 2010; YANG et al., 2011), as variações dos fluxos de detritos, a complexidade e as incertezas do movimento dificultam o estabelecimento de uma única definição inteiramente esclarecida e abrangente para o termo.

Uma das primeiras referências do termo fluxo de detritos surgiu em 1910 no livro de Stiny, onde o movimento foi descrito como uma inundação torrencial na montanha, carregando sedimentos suspensos e transportando grandes quantidades de sedimentos de fundo, a qual, com o aumento da quantidade de sedimentos carregados em algum momento é transformada em uma massa viscosa fluindo como lava pelo vale. Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE) os fluxos de detritos também são chamados de corridas de massa.

Em uma interpretação mais simplificada Hungr et al. (2014) trouxeram uma definição baseada no conceito de Sharpe (1938), onde o fluxo de detritos é caracterizado como um movimento extremamente rápido de detritos saturados com água em um canal íngreme. Em consequência dessa definição, o termo fluxo de detritos fica restrito à ocorrência exclusiva em um canal de drenagem, descartando qualquer outro evento em condições distintas. Por sua vez, Takahashi (2014) descreve o movimento como o fluxo de uma mistura de sedimentos e água de maneira como se fosse um fluxo de fluido contínuo impulsionado pela gravidade, o qual atinge grande mobilidade devido à ampliação dos espaços vazios saturados com água ou lama. Enfatizando a complexidade do fluxo de detritos, definições do termo menos restritivas como a de Takahashi (2014) são mais bem aplicadas, conceituando o movimento com maior abrangência. No entanto, divergências entre o termo e movimentos associados a fluxo de detritos ainda existem.

### **3.2.1. Mecanismo de propagação: Fluxo, Avalanche e Inundação de Detritos**

Desde as primeiras referências do termo fluxo de detritos (STINY, 1910) é evidenciada a variedade de movimentos que envolvem detritos ocorrendo em canais montanhosos. Conforme Mergilli et al. (2012), o termo fluxo de detritos nem sempre se refere exatamente ao mesmo processo, sendo por vezes considerado como um escorregamento de movimento fluido ou como um escoamento com altíssima concentração de sedimentos, conforme a tendência de percepção de quem o analisa. Dessa forma, o fluxo de detritos é definido como um fenômeno intermediário



entre escorregamentos e escoamento de água com sedimentos (RICKENMANN, 1999), o que evidencia a dificuldade em determinar de maneira precisa um limiar que difere a identificação do movimento. Ainda, cadeias de processo em que fazem parte os escorregamentos, os fluxos de detritos e as inundações são bastante recorrentes, associados respectivamente à iniciação do movimento, a propagação, e a dissipação do fluxo.

Juntamente com os fluxos, outros dois movimentos são trazidos no grupo que envolve os detritos da classificação de Hungr et al. (2014), a avalanche de detritos e a inundação de detritos. Não obstante o fluxo de detritos seja o termo mais utilizado, por vezes descrevendo também ambos os movimentos, inundação e avalanche, cada nomenclatura descreve uma condição específica, e embora possam ocorrer de maneira subsequente, consistem em movimentos independentes.

O termo avalanche de detritos foi trazido por Sharpe (1938) fazendo referência a fluxos de detritos que não ocorrem confinados em um canal. Uma definição mais recente de Van Wyk de Vries e Davies (2015) descreve a avalanche de detritos como um movimento de massa rápido e catastrófico, originado de um deslizamento de terra, podendo viajar horizontalmente inúmeras vezes a altura da queda, e onde a força de resistência na camada inferior da massa é inicialmente muito inferior à força motriz do movimento. Swaston et al. (1976) utilizam o termo avalanche de detritos como um rápido movimento de solo raso em áreas de encosta, incorporando na descrição de avalanches os termos fluxo e escorregamento.

Hungr et al. (2001) definiram o termo avalanche de detritos como o fluxo raso de detritos totalmente ou parcialmente saturados em uma encosta íngreme, sem confinamento em um canal específico, ocorrendo em diversas escalas. O autor simplesmente diferencia o termo de fluxo de detritos para avalanche de detritos por ocorrer em um único evento e em qualquer formato de encosta. Outras definições como as de Iverson (1999) e Takahashi (2014) retratam fisicamente a diferença entre os fluxos e avalanches de detritos. Iverson (1999) diferencia a ocorrência da avalanche de detritos pela liquefação contínua apenas da parte inferior do corpo em movimento, atingindo alta mobilidade, enquanto que o fluxo de detritos seria uma liquefação de toda a massa de material, atingindo seu desenvolvimento completo. De maneira mais específica Takahashi (2014) difere os dois movimentos retratando o fluxo como um fenômeno em que a deformação irreversível por cisalhamento prevalece em todos os pontos, enquanto que a avalanche representa um fenômeno

onde o movimento inicia como um bloco de material de larga escala que escorrega pela superfície de cisalhamento e alcança longas distâncias até atingir menores declividades de até 3°. A Figura 2 retrata uma representação de cada classificação.



a.



b.

Figura 2. a. Avalanche de detritos, Itália. (Hunggr et al. 2014). b. Fluxo de detritos, Itália, (Takahashi, 2014).

Por sua vez, o termo inundação de detritos apresenta maior concordância nas definições, apesar de ser eventualmente substituído por fluxo hiperconcentrado (PIERSON e COSTA, 1978; HUNGR et al., 2014). A inundação de detritos é considerada o fluxo num canal cuja matriz é água fortemente carregada com detritos, trazendo maior concentração de sedimentos e com maior granulometria que uma inundação ou um fluxo hiperconcentrado (GUO et al., 2020).

Fundamentalmente, a inundação difere dos fluxos de detritos que costumam apresentar uma carga de sedimentos em peso de 70 a 90%, enquanto que a inundação de detritos geralmente apresenta uma concentração de sedimentos em peso de 40 a 70% (ILINCA, 2021). Além da concentração, fluxos de detritos carregam sedimentos com dimensões muito maiores, transportando grandes blocos e fragmentos de estruturas, e com maior volume de material. De acordo com Wildford et al. (2004), a vazão de pico de um fluxo de detritos pode alcançar até 20 vezes o valor da vazão de pico de uma inundação de detritos. Ademais, a redução da concentração de sedimentos na inundação de detritos resulta em forças de

impacto atenuadas, de forma que a diferenciação também é feita em função do potencial de destruição bastante reduzido em relação ao fluxo.

A inundação de detritos pode surgir no próprio canal de drenagem, ou ser subsequente ao desenvolvimento do fluxo de detritos, quando a maior parte de sedimentos de maior granulometria passa a depositar. No entanto, a identificação da interface de cada segmento é bastante contestável, e nem sempre a faixa de transição é evidente, mesmo por reconhecimento em campo. Conforme Ilinca (2021) a classificação adequada entre fluxos e inundação de detritos pode ser feita com base em fatores geomorfológicos e estratigráficos, identificando os fluxos pela presença de diques e lóbulos de detritos, deposição inversa da granulometria, sedimentos de classificação pouco distribuída e presença de pedregulhos e matacões aleatoriamente orientados no final dos leques de deposição. A verificação em campo de apenas um dos fatores seria suficiente para associar a região à ocorrência de fluxos de detritos, mas sem excluir a possível inclusão da inundação de detritos.

Apesar da extrema importância em particularizar e especificar cada movimento e seus diferentes estágios é também necessário atribuir uma nomenclatura compatível com o processo num todo. Não obstante Hungr et al. (2014) tenham estabelecido definições específicas para cada movimento envolvendo detritos, exemplificaram um caso com a junção dos termos em um único evento. Considerando inicialmente a ocorrência de um deslizamento translacional em uma encosta íngreme, logo a massa deslocada passa a ganhar velocidade, desintegrando-se e ampliando de tamanho até atingir uma caracterização de avalanche de detritos. O material em movimento ao ser introduzido em um canal de drenagem arrasta ainda mais água e sedimentos e transforma-se efetivamente em um fluxo de detritos. Seguindo para zona de deposição, em uma região com menor declividade, as frações mais grossas passam a depositar e o fluxo avança como uma inundação de detritos. Por ser um processo complexo, segundo Hungr et al. (2014), é comum aplicar o termo fluxo de detritos para o cenário inteiro a fim de facilitar as análises de interesse e a própria identificação do movimento.

A Figura 3 apresenta um modelo conceitual entre as classificações dos movimentos associados aos fluxos de detritos, em função da concentração de sedimentos e da mobilidade do movimento, baseado na classificação conceitual de desastres hidrológicos trazida por Kobiyama et al. (2010). Além da representação

individual dos movimentos, a ordem sequencial em que aparecem também é válida, refletindo o cenário inteiro como a ocorrência de um fluxo de detritos, embora composto por diferentes partes (Figura 4). Esse cenário é corroborado por descrições do termo fluxo de detritos conceituando o movimento como uma transição entre escorregamento e inundação (IVERSON, 2004).

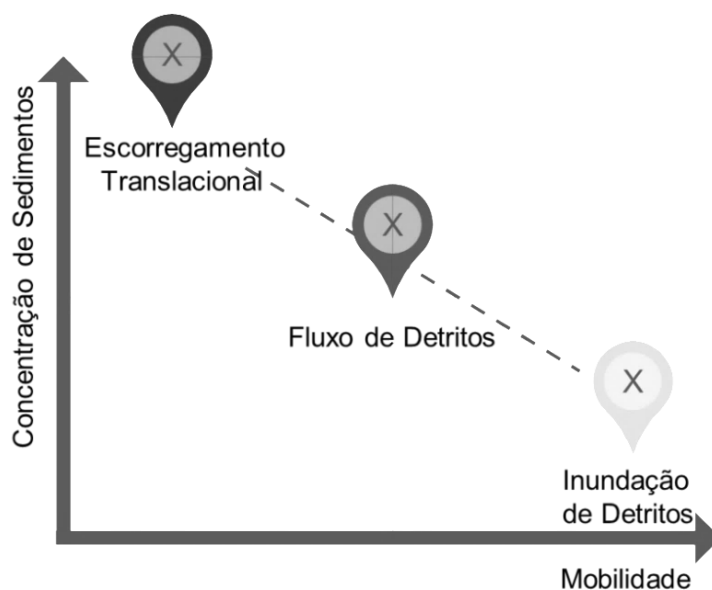


Figura 3. Classificação conceitual dos movimentos associados a fluxos de detritos.



Figura 4. Fluxo de detritos com terminologias por trechos. (MICHEL et al., 2021).

As áreas de origem dos fluxos de detritos são apontadas como os escorregamentos translacionais, que constituem a falha inicial ou ruptura da camada de solo que percorre um curto alcance. Com o aumento da fluidez do material, quando passa a avançar pela encosta, incorporando um maior volume de água e sedimentos, é transformado em fluxo de detritos, estando canalizado ou não. A propagação dos fluxos de detritos que resultam inseridos no canal de drenagem, após a deposição parcial dos sedimentos de maior granulometria em conjunto com o acréscimo da vazão líquida, resulta na inundação de detritos.

Embora não tenha sido incorporada na descrição do fluxo de detritos, a terminologia avalanche de detritos não é descartada, apenas considerada como um movimento isolado, restrita a condições específicas de ocorrência. Diferindo da exemplificação trazida por Hungr et al. (2014), avalanche de detritos é entendida por um evento independente de grande volume de material, em geral alcançando a ordem de  $Mm^3$  (MORENO-ALFONSO et al. 2021; CRUDEN e VARNES, 1996). A avalanche de detritos ocorre a partir de uma única cicatriz de propagação, enquanto que os fluxos de detritos podem ocorrer na forma de fluxo de detritos múltiplo, onde há junções a partir de diferentes origens ou ramificações do fluxo durante o trajeto.

As avalanches abrangem grande parte da encosta, de forma que se assemelham a movimentos como avalanches de neve, além de estar frequentemente associadas à presença de neve e gelo (CRUDEN e VARNES, 1996), podendo também aparecer associadas a detritos vulcânicos (MORENO-ALFONSO et al. 2021; VAN WYK de VRIES e DAVIES, 2015). Por conseguinte, algumas descrições de avalanche de detritos que trazem outras definições discrepantes a essa, são igualmente consideradas fluxo de detritos, embora sejam fluxos de detritos não canalizados.

### **3.2.2. Fluxos de Detritos Canalizados e de Encosta Aberta**

A nomenclatura sugerida por Sharpe (1938) com a separação entre avalanche de detritos e fluxo de detritos, mantida na classificação de Varnes (1978), é por vezes referenciada respectivamente como fluxos de detritos de encosta aberta e fluxos de detritos canalizados. Essa nomenclatura, que separa os fluxos em duas categorias, foi utilizada por Hutchinson (1988), reconhecendo o uso do termo fluxo de detritos

para ambos os movimentos, canalizados ou não, e diferindo do termo avalanche de detritos.

Os fluxos canalizados ou confinados representam os fluxos que ocorrem inseridos em incisões demarcadas do terreno e canais de drenagem durante a maior parte do percurso (BEE et al., 2019). Os fluxos canalizados frequentemente ocorrem em pulsos, uma vez que o trajeto de passagem segue sendo o mesmo canal de drenagem. Os pulsos ocorrem em função da mobilização descontínua de material, geralmente associada a fluxos de detritos múltiplos, que apresentam diferentes origens, mas passam a se conectar em algum ponto. A formação e o rompimento de barragens naturais ao longo do canal também colaboram na geração dos pulsos de vazão do fluxo.

Enquanto os fluxos canalizados permanecem confinados por ao menos a maior parte do trajeto, geralmente os fluxos de encosta aberta permanecem desconectados da rede fluvial de drenagem (LORENTE et al. 2002), embora possam acabar inseridos por parte do percurso. Segundo Marchesini et al. (2020) os fluxos de encosta aberta ocorrem em encostas com sedimentos não consolidados, e descrevem seu próprio trajeto na forma de faixas ou lâminas (BEE et al., 2019), espalhando lateralmente após a sua mobilização.

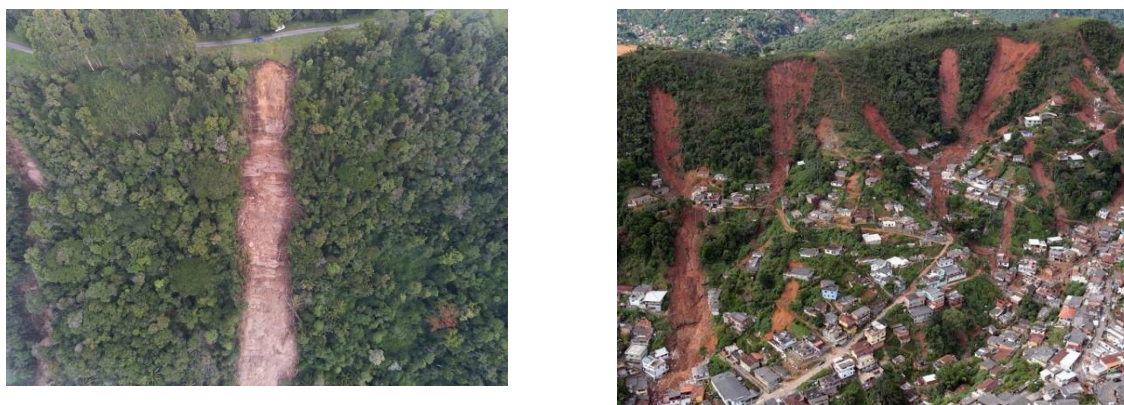
Bee et al. (2019) evidenciam que ambas as categorias são transitórias, de forma que fluxos canalizados podem acabar se abrindo em trechos de menor declividade, como também fluxos de encosta aberta podem acabar inseridos em ravinas rasas ao lado do vale, o que torna difícil a sua classificação. Existe uma transição entre os dois tipos de fluxo, segundo Guthrie et al. (2010) ela ocorre de forma gradativa e nem sempre claramente observável. Portanto, é possível gerar uma nova classe de fluxos de detritos de transição, ou então generalizar para a classificação que representa de maneira mais aproximada o comportamento do movimento. Fannin e Wise (2001) consideraram fluxos de detritos em uma classe de transição, definida por ocorrer com fluxos percorrendo uma encosta aberta logo após um canal confinado, como quando fluxos canalizados cruzam uma estrada.

Em função de condições de relevo e topografia na região do Brasil, os fluxos canalizados nem sempre apresentam elevados graus de confinamento, como frequentemente são caracterizados os fluxos canalizados que ocorrem em áreas montanhosas (Figura 5). Em geral são encontradas condições de confinamento menos encaixado ou menos perceptível devido à presença de vegetação. Fluxos

canalizados, proporcionalmente a um maior grau de confinamento, apresentam um trecho de passagem já estabelecido pela drenagem principal da encosta, facilitando o reconhecimento e previsão da área afetada pelo movimento. Por sua vez, os fluxos de encosta aberta, como na Figura 6, dispõem de maior abrangência e possibilidades de propagação, de forma que a determinação exata da área de passagem do fluxo é mais difícil de ser reconhecida, e fortemente atrelada ao local de origem do movimento.



Figura 5. Fluxo de detritos canalizado (Nepal) (HUNGR et al., 2014).



a.

b.

Figura 6. Fluxos de detritos de encosta aberta. a. Presidente Getúlio, SC em 2020. b. Nova Friburgo, RJ em 2011.

Chen et al. (2009) apontaram os fluxos de detritos de encosta aberta como um dos fenômenos geomorfológicos mais ativos em áreas montanhosas. Devido ao seu caráter de espalhamento e limitada possibilidade de previsão, esse movimento representa uma grande ameaça à população, embora suas forças de impacto sejam

pouco conhecidas e documentadas (LOUP et al. 2002). Bee et al. (2019) afirmam que fluxos de detritos canalizados devem ser modelados de maneira diferente de fluxos de detritos de encosta aberta, justamente por apresentarem comportamentos distintos de propagação, de forma que a separação e classificação entre as categorias é essencial para melhor compreensão do comportamento e posterior previsão e modelagem.

Conforme Lorente et al. (2003) a diferenciação entre os dois grupos também pode ser feita pelas características do canal e pela zona de deposição. Uma abordagem para diferenciação de movimentos, utilizada por Wildford et al. (2004), classifica os processos hidrogeomorfológicos com base na assinatura da zona de deposição, indicando que há uma variação específica perceptível entre a zona de deposição de diferentes processos. Major (1997) também corrobora essa afirmativa ao determinar as propriedades reológicas de fluxos de detritos a partir das características dos seus depósitos. Por conseguinte, identificar e fragmentar o fluxo de detritos em diferentes etapas morfológicas pode auxiliar na compreensão e na classificação do movimento, identificando possíveis similaridades entre fluxos de um mesmo grupo.

### **3.2.3. Etapas de Formação do Fluxo de Detritos**

Considerando o fluxo de detritos na sua representação total é possível separar o movimento em três etapas, a zona de iniciação, a zona de transporte e a zona de deposição. A Figura 7 ilustra as três etapas que configuram o desenvolvimento completo do movimento, sendo abordadas separadamente a seguir.



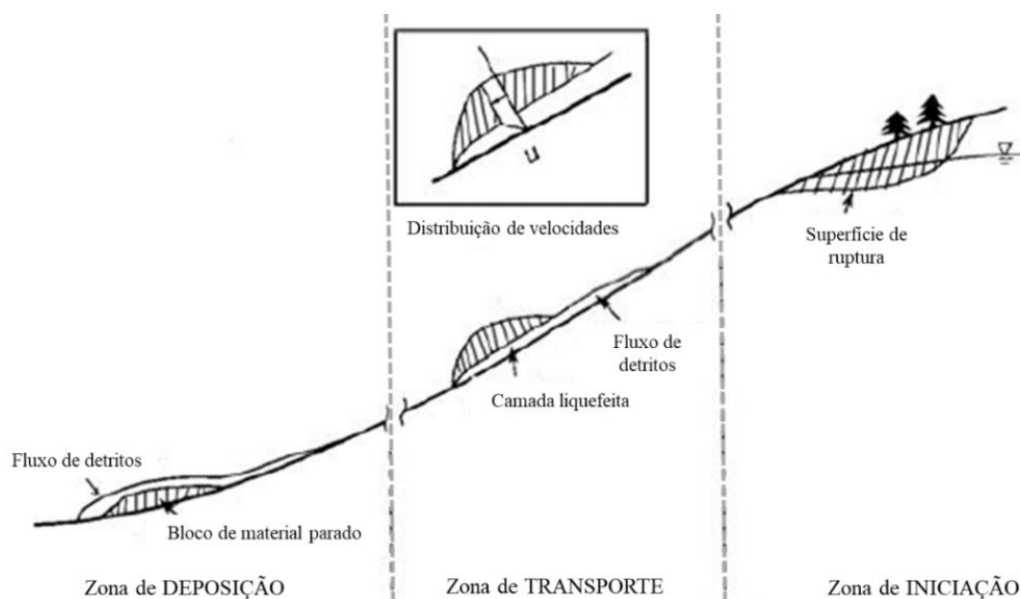


Figura 7. Esquema ilustrativo do fluxo de detritos. Adaptado de Takahashi (2014).

### 3.2.3.1. Origem do Fluxo

A origem de fluxos de detritos está frequentemente associada a escorregamentos translacionais, no Brasil sendo desencadeados por eventos extremos de precipitação, mas podendo também ser provocado por eventos geofísicos, como terremotos. O desenvolvimento de um único evento de ruptura ou a junção de escorregamentos que ocorrem em proximidade e que convergem para um canal de drenagem ou que possuem comprimento de encosta suficiente resulta no surgimento de um fluxo de detritos. Conforme Pastorello et al. (2020) três fatores são essenciais para o desencadeamento de fluxos de detritos, a declividade, a disponibilidade de sedimentos e a entrada de água.

Segundo Takahashi (1991), ainda existem outras duas formas de origem para fluxo de detritos, pela remobilização de material do leito devido ao aumento do escoamento superficial, e devido ao rompimento de barragens. Contudo, o mais comum e de difícil prevenção ainda são os fluxos de detritos com origem a partir de escorregamentos, os quais partindo de um pequeno volume inicial rapidamente ampliam seu tamanho e passam a propagar como fluxo por longas distâncias.

A delimitação da área do escorregamento que dá origem ao fluxo de detritos é frequentemente encoberta pela área de propagação do movimento, embora possível de ser identificada, principalmente em campo, uma zona de maior concavidade na origem na cicatriz. Tseng et al. (2013) analisaram cerca de 300 fluxos de detritos por

imagens de satélite e buscando padrões de concavidade no perfil longitudinal e diferenças de elevação identificaram que mais de 90% das áreas de iniciação apresentaram comprimentos variando de 10 a 130 metros, e mais de 80% larguras entre 20 e 60 metros.

Ellen e Fleming (1987) apontam que escorregamentos que dão origem a fluxos de detritos geralmente ocorrem em declividades entre 25° e 40°, com 5 a 15 metros de largura. Consoante a esse estudo, Hurlimann et al. (2015) trazem o intervalo de declividades de 25-45°, uma largura média de 12.5 metros, e um comprimento médio de 18 metros. Da mesma forma, Dai e Lee (2001) trazem um valor médio de 10 metros de largura, e comprimentos variando entre 6 e 40 metros. Apesar de certa similaridade nos valores, especialmente o comprimento da área de iniciação do fluxo apresenta maior variação, pois acaba incorporando muitas incertezas em função do grau de subjetividade na sua definição.

O local de ocorrência e as dimensões dos escorregamentos são de grande interesse nas análises de predição dos fluxos de detritos, especialmente a fim de estimar as condições de propagação subsequentes. Após a ruptura da camada de solo, a definição do fluxo segue em função da área de transporte, das condições e direcionamento da encosta. No entanto, embora o escorregamento inicial já tenha sido bastante investigado, a transformação da falha inicial em um movimento de fluxo é bastante complexa com muitos fatores de influência (HURLIMANN et al., 2015), conseqüentemente descrita por diferentes possibilidades de teorias.

### **3.2.3.2. Zona de Transporte**

Os escorregamentos transformados em fluxos passam a propagar por encostas que apresentam condições de comprimento e declividade suficientes a fim de garantir a continuidade do processo. Essencialmente, qualquer fator que contribua para o desenvolvimento da inércia desde a origem favorece para a mobilidade e propagação do movimento, incluindo características do material e do próprio percurso (HOFMEISTER et al. 2002). O grau de mobilização do fluxo está muito associado à quantidade de água no material e ao nível de fluidificação. A presença de obstruções no trajeto e variações de confinamento também podem afetar a mobilidade do movimento.

A complexidade dos fluxos de detritos associada a constante variação da composição de materiais permite considerar diferentes abordagens de reologias do fluido e comportamentos de propagação. Takahashi (1977) trouxe uma aproximação do fluxo de detritos com fluido dilatante, conforme a teoria de Bagnold (1954), onde a relação entre deformação do fluido e tensão de cisalhamento é não linear, de forma que uma pequena variação da tensão de cisalhamento gera uma grande deformação do fluido. Segundo o autor, a incorporação de sedimentos e o aumento da quantidade de partículas provoca um maior número de colisão entre elas, conseqüentemente acarretando em maior energia cinética liberada, garantindo grande mobilidade e fluidez ao movimento. Embora tenha sido bastante utilizada, especialmente para fluxos de detritos rochosos (BREITFUSS e SCHEIDEGGER, 1974), a aproximação a partir do fluido dilatante apresentou contradições para descrever a velocidade do fluxo, de forma que posteriormente Takahashi (1991) acabou reformulando a sua utilização (PAIXÃO, 2017).

Outras teorias incluem aproximações com fluido de Bingham (Johnson 1984), especialmente para fluxos de lama (O'BRIEN 1986), onde é considerada uma tensão mínima necessária para início da deformação do fluido. No entanto, a representação foi considerada inapropriada e simplificada para o movimento (GABET et al., 2016). Além disso, parâmetros de Bingham variam e podem trazer pouca acurácia devido à complexidade do fluxo de detritos (PROCHASKA, 2008).

Aproximações com fluido de Herschel-Bulkley também são utilizadas considerando um comportamento de pseudoplasticidade, recomendadas para fluxos mais viscosos compostos especialmente por siltes e argilas (COUSSOT et al., 1998). Além dessas, são comuns simplificações aproximadas com fluidos newtonianos, uma vez que abordagens mais complexas igualmente não são capazes de representar a complexidade inerente do movimento de maneira adequada. Além disso, alguns autores ainda apontam ter obtido boas representações próximas a vazão de pico da onda de fluxo de detritos com regime de fluxo laminar (HUNGR et al., 1984).

As teorias que descrevem a reologia do fluido são fisicamente embasadas e utilizam diversos parâmetros difíceis de serem obtidos e até mesmo estimados para o movimento. Ainda assim são amplamente utilizadas em modelos fisicamente embasados para previsão e modelagem de fluxos de detritos (O'BRIEN et al. 1993; MCDOUGALL e HUNGR, 2004; NAKATANI, 2008). Contudo, considerando as

inúmeras incertezas associadas à definição desses parâmetros, existem relações empíricas que auxiliam na sua determinação (EINSTEN, 1956; CHU, 1983; KRONE, 1984), e até mesmo relações empíricas que buscam simplesmente descrever as principais características da zona de transporte (e deposição), sem necessariamente utilizar equações e modelos de maior complexidade.

### **3.2.3.3. Zona de Deposição**

Os fluxos completamente desenvolvidos assim que atingem áreas de menor declividade, ou, no caso de fluxos canalizados, ao sofrer uma perda de confinamento, têm sua velocidade reduzida e conseqüentemente passam a depositar. Diversas variáveis influenciam na formação dos depósitos, além da própria morfologia do terreno, a composição do fluxo, a concentração de sedimentos e a distribuição granulométrica do material.

Apesar da particularização da zona de deposição de cada fluxo de detritos, Rickenmann e Scheidl (2013) apontam existir uma similaridade geométrica e um padrão de deposição, que pode ser utilizado para previsão de outros fluxos. Os autores definem a formação da zona de deposição em função do local de ocorrência do fluxo, essencialmente com interferência ou ausência de obstáculos. Porém o comportamento esperado de fluxos de encosta aberta difere consideravelmente dos fluxos canalizados, principalmente atrelado às condições do grau de confinamento da encosta. Depósitos de fluxos de detritos são geralmente associados à formação de grandes leques, porém essa geometria é mais comum em fluxos de detritos canalizados que ao atingir o vale sofrem uma súbita perda de confinamento. Todavia, fluxos canalizados em vales encaixados passam a depositar parte do material às margens do rio enquanto grande parte dos sedimentos segue por longas distâncias, muitas vezes como inundações de detritos, tornando difícil delimitar o término da área do fluxo e a própria zona de deposição.

Takahashi (2014) descreve que o depósito de material não ocorre com um alargamento imediato do fluxo sobre toda a zona de deposição, mas que o movimento flui aumentando gradualmente a sua largura. Essa descrição coincide com o comportamento de ampliação gradual da largura de fluxos de detritos de encosta aberta, desde que completamente desenvolvidos. Nettleton et al. (2005) ainda descrevem a zona de deposição dos fluxos de encosta aberta com a possível

formação de diques. A Figura 8 representa o comportamento esperado para cada tipo de fluxo.

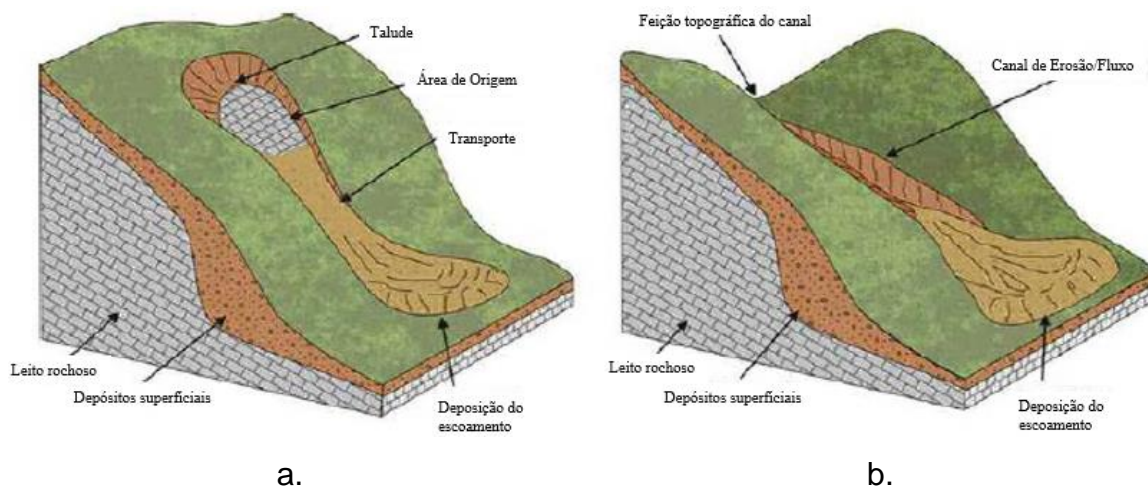


Figura 8. a. Fluxo de detritos de encosta aberta. b. Fluxo de detritos canalizado. Adaptado de Nettleton et al., 2005.

Embora o fluxo de detritos seja associado ao alcance de longas distâncias, a principal condição que interfere como critério de parada do movimento, desconsiderando estruturas de contenção e obstáculos, é a declividade do terreno. As faixas de valores mais similares que são descritas como limiar para deposição de material do fluxo de detritos são os intervalos de 5-12°, 5-13° e 6-10°, respectivamente trazidos por Slaymaker (1988), Fannin e Rollerson (1993) e Bathurst et al. (1997). Johnson et al. (2000) trouxeram valores médios do final da zona de deposição variando conforme a cobertura e uso do solo, com intervalo de 10-13° ocorrendo em áreas florestadas, e uma média de 7° em áreas sem cobertura vegetal.

Uma faixa similar de valores, entre 12-15°, é estipulada em média para ocorrer deposição dos fluxos de detritos canalizados, enquanto que para os fluxos de encosta aberta é determinada a faixa entre 18° e 24° (GUTHRIE et al., 2010). Fannin e Wise (2001) também apontam o limiar de 24° abaixo do qual predomina a deposição de fluxos de encosta aberta. Para os fluxos canalizados apontam que em declividades acima de 10° ainda predomina a erosão do leito, e que a deposição para esse tipo de fluxo é um fator sem importância. Os autores ainda apontam que para fluxos considerados de transição a deposição prevalece em declividades abaixo de 22°.

Apesar da grande variabilidade de valores, o limiar mais baixo de declividade é trazido por Takahashi (2014), apontando o ângulo de 4°, abaixo do qual necessariamente inicia o processo de deposição. E o ângulo mais alto, descrito para depósitos de sedimentos rochosos de maior granulometria, geralmente associado a pequenas bacias, é de 27°, trazido por Rickenmann e Zimmermann (1993).

#### **3.2.4. Composição dos Fluxos de Detritos**

A composição da mistura de materiais envolvidos pode resultar em consequências significativas na morfologia do fluxo. Hungr et al. (2014) reconhecem que o tipo de material é um dos fatores mais importantes e responsável por intervir no comportamento de movimentos de massa. Varnes (1978) definiu dois grandes grupos de materiais envolvidos em fluxos, o grupo das rochas e do solo, sendo este dividido em terra e detritos. Contudo, a diferenciação feita entre os materiais, essencialmente terra e detritos, foi baseada estritamente na proporção de granulometria dos sedimentos. O limiar estabelecido por Varnes (1978), além de muito restritivo, é difícil de ser estimado em campo com exatidão. Por conseguinte, Hungr et al. (2014) buscou uma separação de materiais com base em conceitos de origem, como, por exemplo, solos argilosos ou arenosos, ambientes vulcânicos ou glaciais. Essa substituição gerou as classes de rocha, argila, lama, silte, areia, cascalho, pedregulhos, detritos, turfa e gelo. Ainda são indicados movimentos de classificação transitória, onde deve prevalecer o material com a principal componente de interferência no comportamento físico e no mecanismo de propagação.

Entre as classes propostas, os detritos são os mais difíceis de classificar, justamente por representarem uma mistura de diversos materiais em diferentes proporções ou composições. A própria palavra detritos não possui um equivalente na terminologia geotécnica, mas possui relevância no âmbito de movimentos de massa (BATES e JACKSON, 1984). A tradução do termo detritos, do inglês “*debris*”, ainda é associada ao termo escombros ou massas. Tanto que segundo a classificação e codificação brasileira de desastres (COBRADE, 2012) esse tipo de movimento, inserido no grupo de movimentos de massa, é chamado corrida de massa, com subtipos de solo/lama ou rocha/detrimento.

A composição dos detritos essencialmente resulta da mistura parcial ou completa de solo, rochas, matéria orgânica, ar e água, podendo também incorporar fragmentos de estruturas e edificações. As proporções de granulometria e materiais envolvidos variam conforme o local e as condições de ocorrência. A própria composição diversificada de materiais da classe detritos pode contribuir para descrever o movimento como um dos mais destrutivos, e difíceis de obter parâmetros, devido sua constante variação ao longo do movimento.

Uma relevante discrepância de movimentos envolvendo detritos, embora sejam classificados no mesmo grupo, é a sua ocorrência em regiões de solo mais pedregoso ou áreas florestadas. A forte influência de material orgânico de grande porte como troncos e árvores nos processos fluviais e morfológicos de pequenas bacias declivosas é reconhecida (SWASTON e SWANSON, 1976; KELLER et al. 1979), podendo incorporar em quantidades significativas a massa de fluxos de detritos, especialmente em áreas com exploração madeireira (ILINCA, 2021). Tsunetaka et al. (2021) apontam que os fluxos de detritos são um dos principais provedores de detritos lenhosos nos sistemas geológico e ecológico, devido a remoção de material nas áreas de origem e zonas ripárias, sendo que esse material dificilmente é remobilizado, mesmo em condições de intensa precipitação.

Segundo Jakob e Hungr (2005) fluxos de detritos originados em encostas florestadas podem conter em até 60% do volume em grandes detritos lenhosos. A presença dessa vegetação pode resultar em efeitos significativos nos fluxos de detritos, refletindo em variações no alcance do fluxo, na velocidade e nos padrões de deposição (LANCASTER et al., 2003).

Em regiões climáticas como o Brasil, grande parte dos locais de ocorrência de movimentos de massa consiste em encostas cobertas por vegetação, em geral de florestas naturais e áreas de silvicultura. Segundo Kobiyama e Michel (2014), os fluxos de detritos que ocorrem no Brasil podem ser categorizados como fluxos de detritos lenhosos, enfatizando que esse tipo de material representa grande proporção da massa do movimento. A Figura 9 demonstra alguns registros da composição de material em áreas de deposição de fluxos de detritos lenhosos ocorridos na região sul do Brasil.



a.

b.

Figura 9. Fluxos de detritos lenhosos. a. Alto Feliz em 2000, RS (Foto cedida por moradores locais) b. Alto Vale do Itajai em 2020, SC.

### 3.3. Características dos Fluxos de Detritos

Com o propósito de avançar na compreensão do movimento e gerar estimativas de comportamento, alguns estudos buscam descrever e identificar padrões através da caracterização dos fluxos de detritos. A caracterização das cicatrizes é geralmente feita a partir de criação de um inventário de cicatrizes, ou pela compilação de bancos de dados disponíveis. O inventário de cicatrizes consiste fundamentalmente no mapeamento georreferenciado dos movimentos de massa de uma região, podendo ou não agregar informações adicionais sobre os movimentos, como características morfométricas e geomorfológicas.

Além de estabelecer um valor médio ou intervalos de maior recorrência, também são sugeridas relações empíricas entre as variáveis que permitam descrever ou estimar informações de interesse, inferindo variáveis de difícil medição em campo. Além disso, considerando a vasta diversificação de tipos de fluxo de detritos, em geral as caracterizações podem variar bastante entre si, mas dentro de um mesmo grupo sugerir padrões representativos. Na bacia do rio Mascarada foram levantados inventários apresentados por Cardozo et al. (2021) e SCHARZ (2019), utilizando metodologias diferentes de delimitação das cicatrizes, o que por sua vez resulta em variações nos resultados de caracterização.

As relações empíricas propostas aos fluxos de detritos correlacionam propriedades físicas específicas da região de ocorrência da falha e o comportamento de fluxos já ocorridos, permitindo realizar comparações entre eventos e estabelecer semelhanças através de análises estatísticas. A identificação desses parâmetros e



correlações é a base de modelos empíricos, e essencial para modelagem e previsão de fluxos de detritos. Modelos em geral tendem a depender fortemente do empirismo, mesmo modelos fisicamente embasados partem de uma observação do movimento, ou de equações que foram estabelecidas a partir de experimentos físicos. Portanto, a caracterização e identificação de relações que buscam abranger a maior representatividade do movimento são de grande importância em particular para análises de suscetibilidade, independentemente do tipo de modelagem considerado.

As relações empíricas envolvem tanto os parâmetros obtidos a partir de análises morfométricas das cicatrizes, como largura, área, comprimento, profundidade e volume de material, como também de análises geomorfológicas que abrangem características da própria encosta e propriedades da região como declividade, curvatura, área de drenagem, elevação, orientação, distância do curso hídrico, litologia e uso do solo.

Algumas observações apenas são possíveis de serem feitas ou obtidas após a ocorrência do evento. No entanto, características da região obtidas a partir de monitoramento em campo, ou através de simulações em modelos físicos, permitem gerar estimativas de variáveis como a velocidade do fluxo e a vazão de pico, geralmente associadas aos parâmetros morfométricos. Essas variáveis do movimento representam grande importância na análise de risco, especialmente na execução de sistemas de alerta.

### **3.3.1. Análises Morfométricas e do Fluxo**

#### **3.3.1.1. Alcance do Escoamento**

O alcance dos fluxos de detritos, ou o comprimento da cicatriz ( $L$ ), é uma variável operacionalmente fácil de ser mensurada e que representa uma das principais características para análise de suscetibilidade. Os fluxos de detritos são descritos por atingir longos percursos, mas esse alcance varia consideravelmente em função do material envolvido e do grau de confinamento do fluxo, especialmente a presença de detritos lenhosos pode acabar reduzindo a distância percorrida (LANCASTER et al., 2003). Fluxos de encosta aberta ou canalizados também diferem no potencial de alcance. Hurlimann et al. (2015) apontam que é esperado que fluxos de encosta

aberta atinjam menores distâncias em comparação aos canalizados, em função do espalhamento lateral e afinamento da camada de fluxo. Já os fluxos canalizados, especialmente na ocorrência fluxos múltiplos, acabam percorrendo o canal por distâncias maiores, uma vez que o confinamento acaba limitando as oportunidades de deposição.

Embora alguns registros de alcance do fluxo de detritos cheguem a quilômetros de distância, como fluxos no estado de Santa Catarina com até 1.8 km (MICHEL et al., 2021), em média percorrem dezenas a centenas de metros. Tseng et al. (2013) analisando o comprimento de 314 fluxos de detritos, apontam que mais de 80% dos valores não ultrapassa os 200 metros, e 80% dos 59 fluxos de encosta aberta analisados por Chen et al. (2009) não ultrapassa os 300 metros. Outras medições de comprimento do fluxo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Valores da literatura de comprimento de fluxos de detritos.

*L <sub>médio</sub>	L <sub>máx</sub>	Particularidade	Referência	**N
120m	678m	-	Tseng et al. (2013)	314
43m	785m	-	Dai e Lee (2001)	2103
35m	476m	Largura < 20m	Dai e Lee (2001)	1663
73m	785m	Largura > 20m	Dai e Lee (2001)	435
45m	467m	Tipo: Encosta aberta	Hurlimann et al. (2015)	178
217m	495m	Tipo: Encosta aberta	Chen et al. (2009)	59
1240m	2400m	Tipo: canalizados	Chen et al. (2009)	132

É recorrente que o alcance do fluxo seja representado pelo ângulo de alcance, que foi inicialmente introduzido por Heim (1932), também chamado de *angle of reach* (COROMINAS, 1996). Esse ângulo é definido como o ângulo formado entre o ponto de origem do fluxo, a montante do escorregamento, até o ponto de maior alcance no final da zona de deposição.

Apesar do ângulo de alcance ser considerado essencialmente empírico pode ser determinado com base em uma relação de conservação de energia (Equação 1), conforme exposto por Kobiyama et al. (2004). As variáveis utilizadas podem ser observadas na Figura 10, de onde são extraídas as Equações (2) e (3), as quais inseridas na Equação (1), retornam à Equação (4).

$$mg\Delta s \cdot \sin\theta = \Delta \left( \frac{1}{2}mv^2 \right) + fmg\Delta s \cdot \cos\theta \quad (1)$$

onde,  $m$  é a massa de material deslocado;  $s$  é a distância percorrida pelo movimento,  $g$  é a aceleração da gravidade;  $v$  é a velocidade atingida pelo fluxo e  $f$  é o coeficiente de atrito, considerado constante.

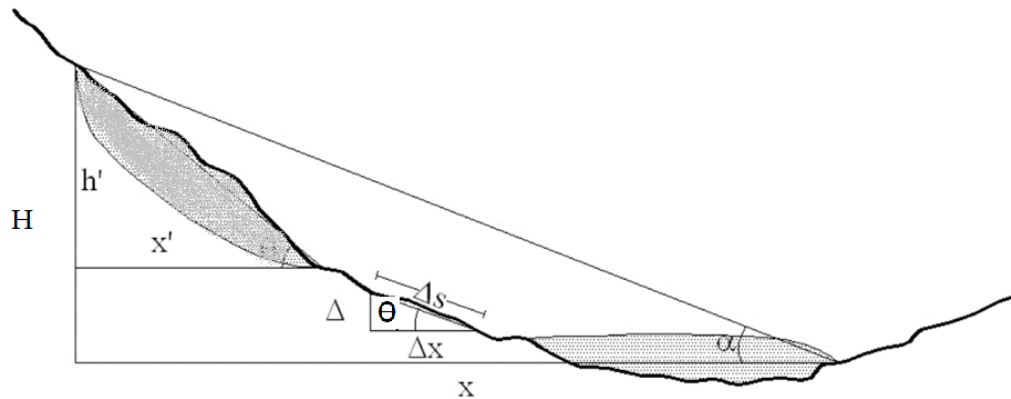


Figura 10. Geometria do fluxo e parâmetros considerados. Adaptado de SCHEIDEGGER (1973) e MORIWAKI (1987) apud KOBIYAMA et al. (2004).

$$\Delta s \cdot \sin\theta = \Delta H \quad (2)$$

$$\Delta s \cdot \cos\theta = \Delta X \quad (3)$$

$$\frac{1}{g} \Delta \left( \frac{1}{2}v^2 \right) = \Delta H - f\Delta X \quad (4)$$

Scheidegger (1973) assumiu as velocidades inicial e final nulas, considerando o movimento desde o momento da ruptura até o final da zona de deposição. Por conseguinte, tornando nulo o termo que emprega a variável velocidade na Equação (4) obtemos a Equação (5), que ainda relaciona o ângulo de alcance com o coeficiente de atrito dinâmico e resulta na fórmula que estabelece o ângulo de alcance como a diferença de elevação entre os dois pontos de início e fim do fluxo de detritos em função da distância horizontal entre eles.

$$f = \frac{H}{X} = \tan \alpha \quad (5)$$

onde,  $h$  é o desnível do ponto a montante do fluxo até o ponto de máximo alcance do material,  $X$  é o deslocamento do fluxo projetado horizontalmente e  $\alpha$  representa o ângulo de alcance.

O valor do ângulo de alcance é utilizado para representar diferentes movimentos de massa, enquanto valores mais elevados são relacionados a escorregamentos, fluxos de detritos são frequentemente associados a valores mais reduzidos devido às longas distâncias percorridas pelo movimento. Embora existam diversos valores trazidos na literatura, o ângulo de alcance de  $11^\circ$  é o mais recorrente associado aos fluxos de detritos (KAPPES et al., 2011). Hungr et al. (1984) ainda sugerem o intervalo de  $10^\circ$  a  $14^\circ$  para fluxos de encosta aberta, e de  $8^\circ$  a  $12^\circ$  para fluxos confinados. Discrepando do intervalo médio de valores encontrados, Dai e Lee (2001) indicam um ângulo de alcance de  $28^\circ$  para os fluxos de detritos. A Tabela 3 resume alguns dos valores associados aos fluxos de detritos.

Tabela 3. Valores do ângulo de alcance trazidos para fluxos de detritos.

<b>Ângulo de alcance</b>	<b>Referência</b>
$7^\circ$	Zimmermann et al. (2014)
$10^\circ$	Scheevel (2017)
$11^\circ$	Rickenmann e Zimmermann (1993)
$11^\circ$	Huggel et al. (2003)
$11^\circ$	Zimmermann et al. (1997)
$12^\circ$	Salvador (2018)
$14^\circ$	Kappes et al. (2011)
$8^\circ$ - $12^\circ$ *	Hungr et al. (1984)
$10^\circ$ - $14^\circ$ **	Hungr et al. (1984)
$28^\circ$	Dai e Lee (2001)

\*Fluxos de detritos canalizados; \*\*Fluxos de detritos de encosta aberta

Guo et al. (2014) avaliaram a correlação do ângulo de alcance com diferentes parâmetros entre eles fatores topográficos, material da rocha e volume. Apesar de terem sido considerados apenas movimentos classificados como deslizamentos, a conclusão aponta uma correlação muito baixa ou até mesmo inexistente entre os parâmetros com exceção do volume, o qual por sua vez é frequentemente utilizado em relações empíricas envolvendo fluxo de detritos. Conforme Rickenmann (2005) muitas equações empíricas de alcance do fluxo reconhecem a importância da influência do volume do fluxo na distância percorrida pelo escoamento (Tabela 4).

Tabela 4. Relações empíricas do comprimento em função do volume.

Relação Empírica	Referência	N	Equação
$L = 25V^{0.3}$	Rickenmann, 1999	-	(6)
$L_{max} = 15V^{1/3}$	Rickenmann, 1999	-	(7)
$L_{max} = 1.9V^{0.16}H^{0.83}$	Rickenmann, 1999	154	(8)
$L/H = 0.97V^{0.105}$	Corominas, 1996	52	(9)
$L = 1.03V^{0.105}H$	Corominas, 1996	-	(10)
$\log(H/L) = -0.77 \log(V) - 0.109$	Corominas, 1996	71	(11)
$\log(H/L) = -0.157 \log(V) - 0.624$	Scheidegger, 1973	33	(12)
$L = 0.04V_D^{1/3}$	Zhou et al., 2019	134	(13)
$L = 0.05H^{0.43}V_D^{0.28}$	Zhou et al., 2019	134	(14)

H é o desnível entre o ponto inicial e final do fluxo (m); V é o volume do fluxo de detritos (m<sup>3</sup>); V<sub>D</sub> é o volume da área de iniciação (m<sup>3</sup>)

### 3.3.1.2. Volume do Fluxo de Detritos

A magnitude do fluxo de detritos claramente depende do tamanho da área de origem e da quantidade de material disponível para ser mobilizado (HUNGR et al., 1984). A ordem de grandeza associada aos fluxos de detritos é de até 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> segundo Takahashi (2014), e de até 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> segundo Iverson (1997). No entanto, Berti e Simoni (2007) apontam que a maior parte dos fluxos de detritos históricos são caracterizados com volumes entre 10<sup>4</sup> e 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>. Apesar de reconhecer o volume total do fluxo de detritos, os efeitos de erosão do canal, inclusão ou remobilização de sedimentos, especialmente de material vegetal, e incorporação de água na mistura de detritos, principalmente a partir de tributários e até mesmo de outros fluxos, torna o volume do fluxo de detritos muito variável desde a sua origem (Figura 11).

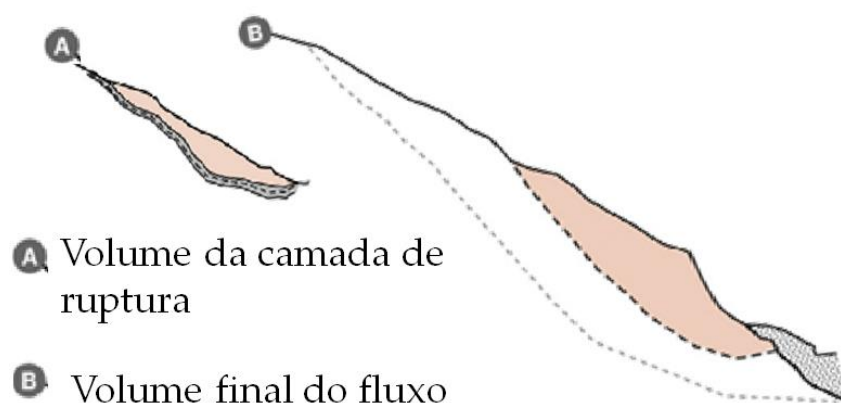


Figura 11. Representação do volume do fluxo de detritos. Adaptado de JABOYEDOFF et al. (2020).

Os fluxos de encosta aberta costumam apresentar maior sensibilidade à magnitude do volume inicial de falha, devido ao seu potencial de deposição em declividades moderadas, enquanto fluxos canalizados demonstram potencial de incorporar grandes volumes ao longo do percurso, e apresentam pequenos volumes de deposição durante o trajeto (FANNIN e WISE, 2001). Jakob e Hungr (2005) inclusive mencionam um fluxo de detritos no qual mais de 90% do volume total foi agregado durante o canal de transporte, após o volume inicial de ruptura.

Uma aproximação do volume pode ser obtida a partir da análise do volume de depósitos de material em conjunto com a área atingida. Entretanto, muito material segue sendo transportado nos eventos seguintes, de forma que a precisão na definição do volume envolvido no fluxo de detritos reduz posteriormente ao período de ocorrência do evento. De maneira simplificada, frequentemente as estimativas do volume também são feitas pelo produto da área afetada e da profundidade média do solo na região de ocorrência do fluxo (GUZZETTI et al., 2009). No entanto, o próprio valor médio da profundidade já representa muitas limitações na sua estimativa.

Apesar de estar associado a muitas incertezas, o volume do fluxo de detritos é um dos principais parâmetros frequentemente associado a outras variáveis do movimento, sendo inclusive o principal componente de diversos modelos empíricos (COROMINAS, 1996; RICKENMANN, 1999; HURLIMANN et al., 2008). Além de relações com alcance do fluxo, Hurlimann et al. (2008) apontam que as relações empíricas que associam o volume de fluxo de detritos com a área de deposição representam grande melhoria para avaliação da suscetibilidade ao movimento. Diversas equações empíricas estimam o volume do fluxo a partir da área afetada

(Tabela 5), sendo recorrente uma taxa de ampliação do volume em função da área, com um expoente de  $1.4 \pm 0.2$ , conforme observado por Klar et al. (2011). Da mesma forma, Larsen et al. (2010) apontam que escorregamentos que envolvem a falha de grandes volumes, expondo a base rochosa, são caracterizados por equações onde o expoente varia de 1.3 a 1.6. As equações da Tabela 5 utilizaram fluxos de detritos com áreas variando na ordem de  $10^0$  a  $10^9$  m<sup>2</sup> (GUZZETTI et al., 2009), sendo que conforme Tseng et al. (2013) o limiar de  $10^4$  m<sup>2</sup> é associado a um melhor desempenho das estimativas.

Tabela 5. Relações empíricas para volume do fluxo de detritos em função da área.

<b>Relação Empírica</b>	<b>Referência</b>	<b>N</b>	<b>Equação</b>
$V = 0.042A^{1.491}$	Ghazipour e Simpson (2016)	335	(15)
$V = 0.452A^{1.242}$	Tseng et al. (2013)	371	(16)
$V = 0.074A^{1.451}$	Guzzetti et al. (2009)	677	(17)
$V = 0.39A^{1.31}$	Imaizumi e Sidle (2007)	51	(18)
$V = 0.263A^{1.292}$	Ten Brik et al. (2006)	160	(19)
$V = 0.148A^{1.368}$	Simonett (1967)	207	(20)

Onde A é a área afetada pelo fluxo de detritos (m<sup>2</sup>), N número de fluxos de detritos considerados.

### 3.3.1.3. Área do Fluxo de Detritos

A área afetada representa uma importante variável na análise de suscetibilidade a fluxos de detritos, especialmente obtida a partir de inventários de cicatrizes, que fundamentalmente apresentam um mapeamento georreferenciado de cicatrizes de eventos já ocorridos. A delimitação da área pode ser definida remotamente de maneira manual ou automatizada. Conforme Holbling et al. (2017) o método mais utilizado na elaboração desses inventários é a partir da interpretação visual das imagens, manualmente identificadas. Embora apresentem uma menor taxa de falsos positivos, em comparação com métodos automatizados, a delimitação manual das cicatrizes apresenta forte dependência das habilidades e experiências do analisador, além de consumir grande quantidade de tempo e recursos. Além da resolução da imagem de análise, fatores como sombreamento das encostas e a ocorrência em

áreas florestadas podem interferir na delimitação, principalmente do perímetro da cicatriz.

Eventos envolvendo fluxos de detritos apresentam grande variabilidade na área atingida, com registros de eventos de até  $10^9$  m<sup>2</sup> (GUZZETTI et al., 2009). O banco de dados analisados por Hurlimann et al. (2015) apresenta cicatrizes com áreas variando de 100 a 1500 m<sup>2</sup>, e Wieczorek et al. (1997) trazem o intervalo de 150 a 3625 m<sup>2</sup> para fluxos de encosta aberta. Já o banco de dados apresentado por Tseng et al. (2013), embora apresente a cicatriz de maior área com  $2 \cdot 10^5$  m<sup>2</sup>, registra 62% das cicatrizes com área de até  $10^4$  m<sup>2</sup>. Por conseguinte, embora apresente grande amplitude de valores, grande parte dos fluxos de detritos apresenta área de até  $10^5$  m<sup>2</sup>. Além disso, fluxos de detritos de encosta aberta geralmente apresentam áreas ligeiramente maiores que os fluxos de detritos canalizados em função das diferentes características reológicas, resultando em um maior espalhamento lateral dos fluxos não canalizados (HURLIMANN et al., 2015).

Equações empíricas de área afetada são estimadas a partir do volume do fluxo (Tabela 6). Da mesma forma, a equação em função do volume também é usada para estimativas da área da seção transversal, considerando coeficientes de menor ordem de grandeza. A área transversal é especialmente reconhecida para fluxos canalizados, uma vez que ocorrem em canais de drenagem e vales encaixados onde a área de seção também pode ser estimada a partir da geometria da vertente da profundidade do fluxo de detritos.

Tabela 6. Equações de área afetada e seção transversal ( $A_T$ ) em função do volume.

<b>Relação Empírica</b>	<b>Referência</b>	<b>(N)</b>	<b>Equação</b>
$A = 6.2V^{2/3}$	Iverson et al., 1998	116	(21)
$A = 20V^{2/3}$	Griswold e Iverson, 2008	64	(22)
$A = 17V^{2/3}$	Berti e Simoni, 2007	90	(23)
$A_T = 0.5V^{2/3}$	Iverson et al., 1998	27	(24)
$A_T = 0.1V^{2/3}$	Griswold e Iverson, 2008	64	(25)
$A_T = 0.08V^{2/3}$	Berti e Simoni, 2007	69	(26)

A área dos fluxos de detritos, em conjunto com o comprimento, pode ainda ser usada para estimar o fator de forma do movimento (Equação (27)). Esse coeficiente é geralmente utilizado para descrever o formato de bacias hidrográficas, onde maiores



coeficientes representam formatos mais arredondados e vazões de pico mais elevadas, enquanto valores mais baixos representam formatos mais alongados e menores vazões de pico. Análogo a isso, o fator pode representar fluxos com menor mobilidade e maior dispersão, ou fluxos longos e mais estreitos (Figura 12).

$$FF = \frac{A}{L^2} \quad (27)$$



Figura 12. Representação de fluxos com alto e baixo FF. Adaptado de SEDEC, 2018.

Chen et al. (2009) apontam que os fluxos de encosta aberta apresentam valores do fator de forma variando de 0.02 a 0.55, com uma média de 0.14. Enquanto que os fluxos canalizados apresentam valores variando de 0.07 a 3.1, com uma média de 0.6. Portanto, considerando a base de dados utilizada pelos autores, os fluxos canalizados apresentam formatos mais arredondados que os fluxos de encosta aberta, o que provavelmente está associado a zonas de deposição no formato de leques aluviais.

#### **3.3.1.4. Profundidade**

Em conjunto com a área afetada, a profundidade é um parâmetro necessário para as estimativas do volume do fluxo de detritos, sendo diretamente associado ao valor de profundidade do solo na região. Alguns valores de profundidade do fluxo variam de 5 a 25 metros (TSENG et al., 2013), embora sejam mais comuns valores mais baixos, inseridos no intervalo trazido por Dai e Lee (2001) de 0.5 a 2 metros de profundidade, com médias de 1.7 metros (WIECZOREK et al., 1997), 1.4 metros (DAI e LEE, 2001) e 1.8 metros (KRENCHEV et al., 2021). Além disso, os dados trazidos por Guthrie et al. (2009) indicam maiores profundidades associadas aos fluxos de encosta aberta do que os fluxos canalizados.

Os valores de profundidade do fluxo de detritos são obtidos por levantamentos em campo, a partir de marcas de passagem do movimento ou altura de depósitos de material. Alguns métodos matemáticos que consideram a reologia do fluido também são utilizados para estimativas da altura do escoamento. Além disso, especialmente para estimativas do volume de material envolvido, são consideradas as profundidades de solo na região de ocorrência do evento, obtidas por levantamentos em campo e modelos de estimativa de profundidade. Conforme Wieczorek et al. (1997) esses valores de profundidade do solo associados as áreas de ocorrência variam de 0.25 a 2.5 metros.

#### **3.3.1.5. Largura do Fluxo de Detritos**

A predição das características do fluxo de detritos, incluindo o alcance, a área e a largura são importantes para a avaliação de risco (HURLIMANN et al., 2015), embora a largura seja o parâmetro menos frequente entre as análises de fluxo, considerando que a área e o alcance são bem representativos do movimento. A Tabela 7 aponta algumas larguras obtidas de caracterizações de fluxos de detritos na literatura. Embora a largura máxima tenha sido próxima dos 500 metros, em médias as larguras tendem a ser bem menores. Dai e Lee (2001) definiram o limiar de 20 metros para classificar os fluxos de detritos como largos, indicando que acima desse valor, os fluxos também apresentam uma tendência de maiores comprimentos.

Guthrie et al. (2010) associam as larguras maiores com áreas de maior declividade, geralmente referentes às áreas de iniciação, enquanto que ao longo do percurso indicam que a largura segue levemente abaixo da largura média do fluxo, caracterizando morfologias estreitas e alongadas aos fluxos da região, possivelmente associadas aos fluxos canalizados.

Tabela 7. Larguras média e máxima de fluxos de detritos.

$W_{\text{médio}}$	$W_{\text{máx}}$	Referência	N
98m	482m	Tseng et al. (2013)	314
22m	300m	Guthrie et al. (2010)	331
15m	30m	Lorente et al. (2003)	61
10m	>20m	Dai e Lee (2001)	56
13m	~100m	Wieczorek et al. (1997)	208

### 3.3.1.6. Velocidade

Fluxos de detritos são movimentos de massa extremamente rápidos, com registro de velocidade de até 28 m/s (KANG e LEE, 2018). A estimativa de velocidade do fluxo é de grande importância em análises de risco, principalmente contribuindo com sistemas de alerta na antecipação e controle do tempo em ações de resposta a desastres. Entretanto, essa informação é relativamente difícil de ser obtida em campo para fluxos de detritos, de forma que a maioria das equações de velocidade média é baseada em dados empíricos obtidos em protótipos e fluxos gerados em laboratório, com misturas simplificadas de materiais que simulam o movimento (RICKENMANN, 1999).

Lo (2000) aponta um formato geral de equação utilizada para determinar a velocidade média do fluxo de detritos ( $v$ ). A Equação (28) é baseada no princípio de Manning, no entanto, a variável do raio hidráulico é substituída pela profundidade do fluxo ( $h$ ), por ser um parâmetro mais acessível de ser obtido, e por apresentar resultados similares no caso de canais mais largos. A constante ( $a$ ) da equação é o fator que incorpora as propriedades do canal e material envolvido no fluxo, sendo inversamente proporcional à profundidade do fluxo, conforme coeficientes sugeridos por Du et al. (1987) (Tabela 8). Da mesma forma, os expoentes  $b$  e  $c$  que acompanham a profundidade e o termo da declividade de fundo do canal ( $S$ ) são

coeficientes considerados para calibração, em função das características e condições do movimento.

$$v = a \cdot h^b S^c \quad (28)$$

Tabela 8. Valores sugeridos para a, conforme profundidade. (DU et al., 1987).

Coeficiente a	h (m)
10	<2.5
9	3
7	4
5	5

Prochaska et al. (2008) constataram que a combinação  $h^2S$  é a que produz maiores valores de correlação, diante diversas combinações (Tabela 9). A Equação (29) apresenta a relação encontrada pelos autores de maior correlação,  $R^2$  igual a 0,49, embora outras equações da Tabela 9 ainda tenham atingido valores próximos de correlação. Além das relações em que a velocidade é apenas função da declividade e profundidade do fluxo, outras equações foram sugeridas conforme a Tabela 10.

Tabela 9. Relações empíricas para velocidade em função da profundidade do fluxo e declividade. (PROCHASKA et al. 2008).

Relação Empírica	Formato	Referência	$R^2$	Equação
$v = 0.35h^2S + 5.36$	$h^2S$	Prochaska et al. (2008)	0.49	(29)
$v = 3.32h^{2/3}S^{1/5} + 0.70$	$h^{2/3}S^{1/5}$	Lo (2000)	0.47	(30)
$v = 0.55h^{3/2}S^{1/2} + 4.59$	$h^{3/2}S^{1/2}$	Hungr et al. (1984); Lo (2000)	0.47	(31)
$v = 4.47h^{2/3}S^{1/2} + 1.71$	$h^{2/3}S^{1/5}$	Lo (2000); Rickemann (1999)	0.44	(32)
$v = 6.53h^{1/2}S^{1/2} + 1.03$	$h^{2/3}S^{1/5}$	Rickemann (1999)	0.37	(33)
$v = 8.90h^{0.3}S^{1/2} + 1.06$	$h^{2/3}S^{1/5}$	Rickemann (1999)	0.24	(34)

Tabela 10. Relações empíricas para velocidade.

Relação Empírica	Referência	Equação
$v = 2.1Q_p^{0.33}S^{0.33}$	Rickenmann (1999)	(35)

$v = (1/3)\rho gh^2(S/\mu)$	Rickenmann (1999)	(36)
$v = 2g\Delta h^{0.5}$	Chow (1959)	(37)
$v = 1.21g\Delta H$	Wigmosta (1983)	(38)
$v = (1/n)h^{2/3}S^{1/2}$	Du et al (1987)	(39)
$v = ah^{2/3}S^{1/5}$	Du et al (1987)	(40)

Onde ( $Q_p$ ), é a vazão de pico, ( $g$ ) aceleração da gravidade, ( $\mu$ ) viscosidade dinâmica do fluxo de detritos, ( $\rho$ ) massa específica, ( $H$ ) variação de altura do fluxo ( $H$ ), e ( $n$ ) coeficiente de rugosidade de manning.

Embora existam diversas relações empíricas para estimativa da velocidade, são poucos estudos e validações disponíveis. Ainda assim, a maior parte das relações é feita em função da profundidade do fluxo e da declividade do canal, o que restringe sua utilização fundamentalmente para os fluxos canalizados.

### 3.3.1.7. Vazão de Pico

Uma das variáveis que descreve bem a magnitude de um fluxo de detritos é a vazão de pico. Jakob (2005) define a vazão de pico como o maior produto da área da seção transversal pela velocidade. Considerando a grande quantidade de material incorporado ao fluxo de detritos, além da própria vazão líquida associada ao movimento, valores muito elevados de vazão de pico são atingidos, conforme Hungr (2001) podendo chegar a 40 vezes o valor da vazão de pico de uma inundação.

Devido à complexidade do mecanismo de formação dos fluxos de detritos, calcular ou até mesmo estimar a vazão de pico permanece um desafio (GUO et al., 2020). Dificilmente a vazão de pico pode ser diretamente mensurada, considerando muito imprevisíveis as condições de ocorrência e magnitude do evento. A medição indireta é frequentemente utilizada através de observações em campo ou modelos empíricos. As observações em campo incluem a medição da seção transversal e área afetada pelo fluxo, com estimativas da velocidade, enquanto que relações empíricas são estimadas principalmente a partir do volume do fluxo de detritos, conforme a Tabela 11.

Tabela 11. Relações empíricas da vazão de pico ( $Q_p$ ) e volume do fluxo de detritos ( $V$ ).

Relação Empírica	Particularidade	Referência	N	Equação
$Q_p = 0.135V^{0.78}$	Pedregoso	Mizuyama et al. (1992)	50	(41)
$Q_p = 0.019V^{0.79}$	Lama	Mizuyama et al. (1992)	100	(42)
$Q_p = 0.04V^{0.90}$	Pedregoso	Bovis and Jakob (1999)	-	(43)
$Q_p = 0.1V^{0.83}$	Pedregoso	Rickenmann (1999)	-	(44)
$Q_p = 0.293V_w^{0.56}$	Rompimento de barragem	Costa (1988)	9	(45)

Onde,  $Q_p$  é a vazão de pico ( $m^3/s$ ) e  $V_w$  é o volume de água envolvido ( $m^3$ ).

### 3.3.2. Análises Geomorfológicas

#### 3.3.2.1. Unidades de Encosta

Além da escala de bacia hidrográfica as unidades de encosta são consideradas áreas de resposta local, considerando similaridades de propriedades hidrogeomorfológicas. As unidades de encosta, referenciadas como SU - *slope units*, são segmentadas a partir da drenagem e linhas de divisão, e correspondem a uma única encosta, uma combinação de encostas adjacentes ou uma pequena bacia (ALVIOLLI et al., 2016) (Figura 13). A delimitação das SU é vinculada aos processos hidrológicos e geomorfológicos que moldam a paisagem, por esse motivo são consideradas apropriadas para modelagem e análises de suscetibilidade a movimentos de massa (ALVIOLLI et al., 2016).



Figura 13. Exemplificação de unidades de encosta. (XIAO et al., 2013).

Embora o conceito de SU esteja vinculado à delimitação de uma única encosta de mesma resposta hidrogeomorfológica, além da variação da escala de análise, a segmentação das unidades é fortemente vinculada ao método e parâmetros considerados. Um estudo trazido por Alvioli et al. (2020) fragmentou a Itália em diferentes unidades de encosta de áreas muito discrepantes, que variam na ordem de  $10^3$  a  $10^7$  m<sup>2</sup>. Apesar disso, esse mapeamento de SU foi considerado para diferenciar fluxos de detritos canalizados e os de encosta aberta, com o critério de que fluxos com uma porcentagem de área menor que 95% em uma mesma SU são classificados como fluxos canalizados (MARCHESINI et al., 2020). Esse critério considera que os fluxos segmentados pelos limites das SU, normalmente as próprias linhas de drenagem, coincidem com a região dos vales, consequentemente caracterizando os fluxos de detritos canalizados.

A ocorrência dos fluxos de detritos na encosta pode ainda ser caracterizada quanto ao distanciamento do divisor de águas e o alcance do fluxo até o canal. Imaizumi e Sidle (2007) consideraram uma classificação simplificada quanto à mobilidade dos fluxos de detritos, separando entre os fluxos que alcançam o canal (A) e os fluxos que terminam na própria encosta (B), sendo os do tipo A divididos entre os fluxos que alcançam o canal e logo são interrompidos (A1), e os que seguem por longas distâncias (A2). De maneira análoga, pode ser chamados de fluxos conectados ou não ao canal de drenagem. Essa classificação pode ser associada aos fluxos de encosta aberta (B), canalizados (A2) e os de transição (A1). Os fluxos do tipo B, que não atingiram o canal, são descritos por apresentar entre 40 e 280 metros de distância dos canais de drenagem (DAI e LEE, 2001). Esse mesmo tipo de fluxo é descrito por distanciar dos limites de cabeceira da bacia em valores de 5 a 100 metros, sendo que as regiões mais próximas do limite da bacia tendem a apresentar maior probabilidade de ocorrência de iniciação dos fluxos (WIECZOREK et al., 1997). A proximidade dos canais de drenagem é ainda utilizada como parâmetro de entrada em modelos de suscetibilidade a fluxos de detritos (BEE et al., 2019), considerando que os fluxos que acabam inseridos na drenagem apresentam a possibilidade de propagação por maiores distâncias, além de trajeto provavelmente conhecido. Bee et al. (2019) ainda descrevem fluxos de detritos por ocorrer em canais de primeira e segunda ordem.

### 3.3.2.2. Declividade

A declividade é um dos parâmetros de maior influência para desenvolvimento dos fluxos de detritos. As declividades variam com a etapa considerada do movimento, geralmente segmentadas entre as declividades de iniciação, as declividades do canal de propagação e as declividades em que ocorre o início da deposição do material, na base do fluxo. Heald e Parsons (2005) reforçam que a declividade necessária para iniciação do fluxo, pode não ser a mesma declividade requerida para manter a mobilidade do movimento na zona de transporte. A Tabela 12 traz valores de declividades em cada etapa, considerando uma base de dados de fluxos de encosta aberta.

Tabela 12. Declividades média, mínima e máxima de 961 fluxos de detritos de encosta aberta. (LORENTE et al., 2003).

	<b>Origem</b>	<b>Propagação</b>	<b>Base</b>
$S_{média}$	33.9°	33.7°	17.8°
$S_{mínima}$	18°	25°	8°
$S_{máxima}$	45°	44°	27°

Os valores vão de acordo com o estudo trazido por Chen et al. (2009), indicando que mais de 80% dos fluxos de encosta aberta analisados apresentavam declividades da encosta entre 30° a 45°, com um média de 38°. Em geral, fluxos de encosta aberta estão associados a valores mais altos de declividade, já os fluxos canalizados, conforme estudo de Chen et al. (2009), embora apresentem uma faixa de variação de 9° e 44°, menos de 10% alcançou valores acima de 30°, sendo a média de declividade 22°. Considerando fluxos de detritos canalizados e de encosta aberta ocorridos na bacia do rio Mascarada, Cardozo et al. (2021) apontam um valor médio de 36°, e 87% da cicatrizes inseridas no intervalo de 25° a 45°.

A declividade é uma variável bastante relacionada com a área de drenagem, gerando padrões que permitem diferenciar movimentos e processos predominantes (TAROLLI e FONTANA, 2009). As relações da declividade com a área de contribuição são inclusive reconhecidas para diferenciar áreas canalizadas e não canalizadas (MONTGOMERY e DIETRICH, 1992), e gerar limiares de ocorrência de eventos raros e extremos como fluxos de detritos (HORTON et al., 2008; STOCK e DIETRICH, 2013). A (Figura 14) trazida por Chen et al. (2009), identifica a relação



da declividade e área de contribuição dos fluxos de detritos, compreendidos entre duas linhas de regressão, descritos pelas equações do limite inferior (46) e superior (47) da dispersão dos dados, indicando ainda uma tendência de separação dos fluxos de detritos canalizados e de encosta aberta através do limiar de 0.03 km<sup>2</sup> de área de contribuição.

$$S = 9A_c^{-0.15} \quad (46)$$

$$S = 27A_c^{-0.15} \quad (47)$$

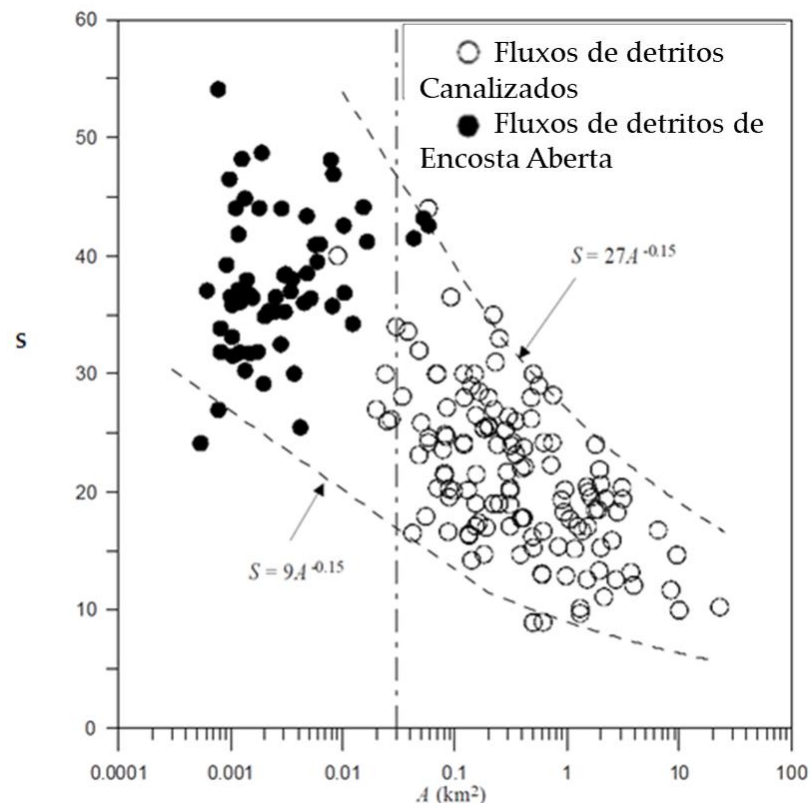


Figura 14. Relação entre área de contribuição (km<sup>2</sup>) e declividade em graus (S) dos fluxos de detritos (Adaptado de CHEN et al., 2009).

### 3.3.2.3. Elevação e Orientação

A elevação e orientação das encostas também pode influenciar na ocorrência dos fluxos de detritos. As diferenças de altimetria refletem diretamente as condições do terreno, especialmente associadas à litologia local. A orientação das encostas influencia diretamente na retenção de umidade e na cobertura do solo que por sua vez interferem na resistência e suscetibilidade da camada de solo ao rompimento

(WIECZOREK et al., 1997). A orientação é frequentemente considerada um importante fator na previsão de movimentos de massa, embora tenha poucas evidências de que sozinha seja confiável na previsão de fluxos de detritos (WINTER et al., 2005).

Em relação à elevação das encostas, Lorente et al. (2003) apontam o intervalo de 950 a 1200m em que os fluxos de detritos são especialmente frequentes, considerando dados na Espanha, e associando essa altimetria ao uso do solo na região destinado as áreas de cultivo. Na região da Serra do Mar Paulista, Vieira (2007) trouxe o intervalo de 400m a 800m associado a maior suscetibilidade de ocorrência de escorregamentos. Dai e Lee. (2001) indicam ainda que a ocorrência dos fluxos é mais propensa em encostas com camadas mais finas de colúvio geralmente em elevações intermediárias, uma vez que elevações muito altas normalmente consistem de regiões mais rochosas, e elevações muito baixas são cobertas por camadas mais espessas de colúvio e solos residuais, além de apresentar a própria suavidade do terreno.

#### **3.3.2.4. Curvatura**

A Curvatura da encosta é obtida pela segunda derivada da superfície, representada em dois vetores, a curvatura do plano e a do perfil (Figura 15). A curvatura do plano, também reconhecida como curvatura horizontal, é perpendicular à direção da máxima declividade e refere-se ao caráter convergente, divergente ou retilíneo do fluxo. A curvatura do perfil, reconhecida como curvatura vertical, é paralela indicando a direção máxima da declividade, e classifica a vertente da encosta como côncava, convexa ou retilínea.

A concavidade da encosta, geralmente associada à convergência de fluxo e áreas de maior concentração de água, é frequentemente descrita pela maior incidência de escorregamentos e fluxos de detritos (KANG et al., 2017; BLAUTCH et al., 2010; HORTON et al., 2008; DIETRICH et al., 1986). No entanto, mesmo reconhecendo essa afirmação, alguns autores descrevem a maior ocorrência de escorregamentos e fluxos de detritos sobre curvaturas retilíneas (VIEIRA, 2007, WIECZOREK et al., 1997; SELBY 1985) e até mesmo convexas (KOZCIAK et al., 2005; HEALD e PARSONS, 2005).

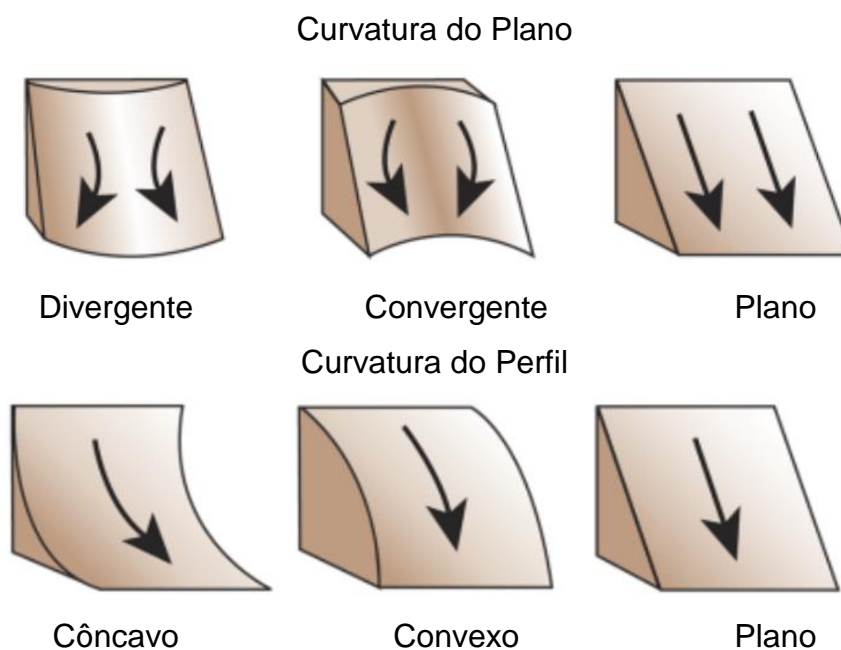


Figura 15. Perfis e planos de curvatura da encosta. Adaptado de (Esri, 2022).

Conforme Kang et al. (2017) essas diferenças podem ser causadas pela utilização de bancos de dados abrangendo diferentes localidades, e possivelmente com características de iniciação distintas. Essa diferença pode também estar associada ao grau de confinamento do fluxo predominante na análise. Fluxos de detritos de encosta aberta tendem a ocorrer em encostas de formato mais plano e retilíneo (HURLIMANN et al., 2015; MCKENNA et al., 2011), já os fluxos canalizados geralmente iniciam em áreas de maior concavidade, como *hollows*, e seguem por vertentes convergentes percorrendo os canais de drenagem.

### 3.4. Suscetibilidade a Fluxos de Detritos

O potencial de destruição de fluxos de detritos nem sempre pode ser reduzido pela estabilização das áreas de origem (HUNGR, 1995). Vales bem definidos com passagem de fluxos de detritos canalizados, onde o trajeto já é conhecido, facilitam a implementação de medidas estruturais, embora sejam bastante onerosas e nem sempre efetivas. Portanto, a aplicação de medidas típicas de mitigação, como obras e projetos de contenção, nem sempre representam a melhor alternativa. Por outro lado, as medidas não estruturais podem ser efetivamente utilizadas como

estratégias de prevenção e reduzir os desastres causados por fluxos de detritos (CHEN e WU, 2014).

Análise de suscetibilidade representa uma das principais bases do mapeamento de risco a desastres, previsto por lei para todo o território nacional (BRASIL, 2012). Melo e Zererê (2017) definem dois grupos de métodos de avaliação de suscetibilidade para fluxos de detritos, os métodos qualitativos (heurísticos) e os métodos quantitativos (estatísticos e determinísticos). Métodos heurísticos consistem em uma avaliação da área de estudo por conhecimentos gerais, e na definição subjetiva da suscetibilidade através de análises geomorfológicas e índices. Uma metodologia fundamentalmente heurística foi utilizada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) para realização do mapeamento de suscetibilidade a fluxos de detritos em mais de 500 municípios do país. O método consiste na definição de sub-bacias de níveis baixo, médio, alto e muito alto para a ocorrência dos fluxos de detritos, sem apresentar a delimitação de áreas afetadas ou estimativas de alcance do fluxo. A subjetividade associada a essas definições é considerada uma das principais limitações do método, além de serem desconsiderados os históricos de ocorrência do movimento na área mapeada. A Figura 16 apresenta a área indicada como suscetível a fluxos de detritos para o município de Alto Feliz, RS, pela metodologia utilizada pela CPRM, em comparação com áreas de ocorrência de fluxos de detritos no município.

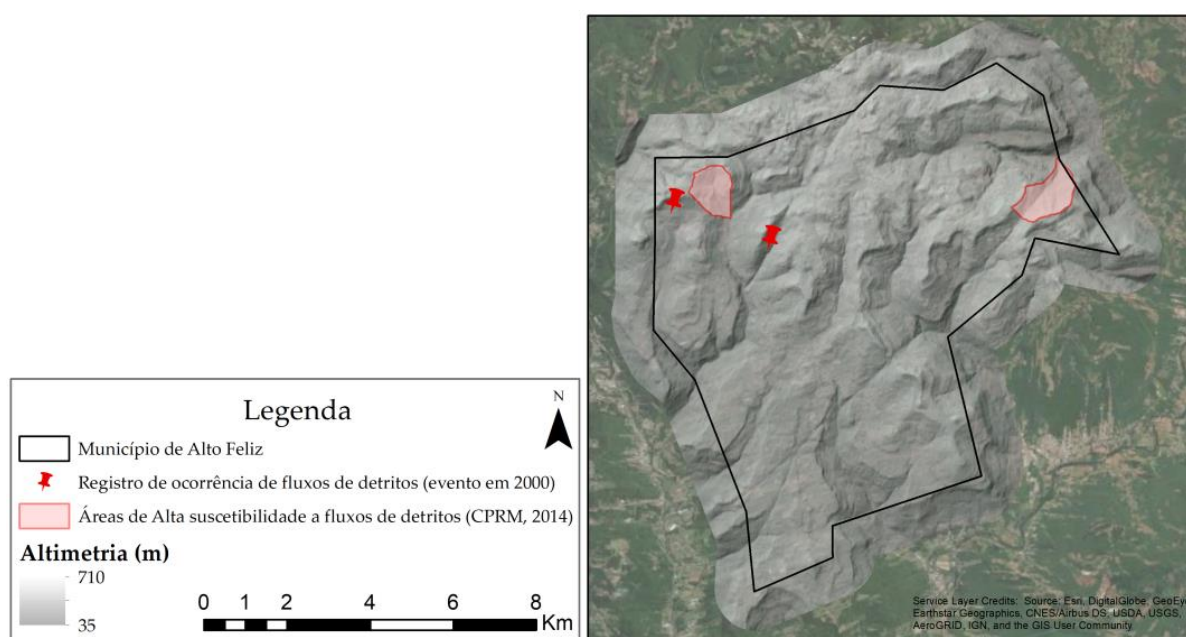


Figura 16. Áreas suscetíveis a fluxos de detritos para o município de Alto Feliz, RS.

Os métodos quantitativos, por sua vez, a partir da utilização de modelagem matemática, resultam na representação do fluxo de detritos, buscando quantificar parâmetros e reproduzir um cenário de maior probabilidade de ocorrência. Conforme McDougall et al. (2016), esses métodos de análise podem ainda ser separados em dois grupos: os métodos empíricos-estatísticos, baseados em correlações estatísticas e dados históricos (BERTI e SIMONI, 2014; SCHILLING, 2014; REID et al., 2016), e os métodos analíticos, fundamentados em equações fisicamente embasadas, também chamados de modelos numéricos, dinâmicos ou determinísticos (O'BRIEN et al. 1993; MCDOUGALL e HUNGR, 2004; NAKATANI, 2008).

Além da modelagem matemática, que compreende os modelos fisicamente embasados e os modelos empíricos, existe também a modelagem física. Os modelos físicos são experimentos que buscam representar o comportamento do fluxo em escala real (MAJOR, 1997; IVERSON, 2010) ou escala reduzida em laboratório (RICKENMANN et al. 2003; TSAI, 2006). Conforme McKinnon (2010), em se tratando de fluxo de detritos, os modelos físicos podem ser difíceis, perigosos, caros e de utilidade restrita. Por conseguinte, os modelos matemáticos são amplamente difundidos, geralmente de fácil utilização e vantajosos economicamente.

#### **3.4.1. Modelos Fisicamente Embasados**

Modelos fisicamente embasados representam fisicamente o fenômeno a partir de equações físicas com a definição de diversos parâmetros e normalmente requerem maior esforço computacional. Conforme Zhou et al. (2019) a obtenção de maneira apropriada desses parâmetros é muito difícil, o que representa uma grande limitação desses modelos. Além da dificuldade na obtenção e na calibração dos dados, cada parâmetro está associado a uma série de incertezas reconhecidas, procedendo em um somatório de incertezas acumuladas vinculadas ao resultado final do modelo. Além disso, na tentativa de melhor representar a mecânica envolvida no processo, modelos fisicamente embasados são, em geral, aplicados localmente, dificultando sua utilização em análises regionais de suscetibilidade. No entanto, são modelos amplamente aplicados, pois permitem controlar as condições de ocorrência do fluxo

de detritos a partir dos parâmetros físicos de entrada do modelo. Portanto, um mesmo modelo pode simular fluxos de detritos canalizados e de encosta aberta (ZIMMERMANN et al., 2020), com diferentes materiais envolvidos.

Modelos dinâmicos fisicamente embasados permitem diversas possibilidades de simulação, desde a propagação unidimensional ou bidimensional, como KANAKO-2D (NAKATANI, 2008), MassMov2D (BEGUERIA et al. (2009) e FLO-2D (O'BRIEN et al., 1993), até em três dimensões como o RASH3D (PIRULLI e SORBINO, 2008) e DAN-3D (McDOUGALL e HUNGR, 2004). Em geral, os modelos são baseados em conservação de massa e consideram diferentes teorias de reologia do fluxo de detritos. O grande benefício desses modelos é a obtenção de mais informações sobre a propagação do fluxo, permitindo resultados com maior precisão. No entanto, são fortemente dependentes dos dados de entrada do modelo, de forma que a utilização de dados duvidosos resulta em grande incerteza nas simulações e informações obtidas.

O modelo trazido por Paul (2020) propõe uma abordagem fisicamente embasada simplificada, considerando poucos parâmetros de entrada. Diferente de modelos mais complexos como Kanako-2D (NAKATANI, 2008), onde é necessário estipular um volume inicial, parâmetros de geometria do canal, características do material e coeficientes de erosão e sedimentação do trecho, o modelo de Paul (2020) requer apenas as áreas de iniciação associadas a uma profundidade, um modelo digital do terreno e um valor de viscosidade cinemática. O modelo resulta do acoplamento de um modelo de balanço de massas e de direcionamento de fluxo, gerando estimativas da profundidade do fluxo de detritos, do alcance e da velocidade. Pode ser estipulado um intervalo de tempo para cada passo da simulação, onde a diferença de profundidade entre as células de propagação do fluxo a cada intervalo de tempo é utilizada como critério de parada. Considerando uma reologia de fluxo dilatante, em conjunto com um método de fluxo múltiplo, Paul (2020) obteve taxas de acerto de até 84% para simulação de fluxo de detritos.

### **3.4.2. Modelos Empíricos**

Os modelos empíricos são essencialmente baseados em relações empíricas que sucedem de uma série de dados observados, em campo ou em laboratório, buscando abranger a maior representatividade possível de um fenômeno. As

próprias equações e relações descritas para caracterização do movimento são a base de modelos empíricos, e geralmente são aplicadas em ambientes de geoprocessamento a fim de facilitar a espacialização e visualização dos resultados. Barragán et al. (2015) trazem alguns modelos empíricos que resultam essencialmente em equações empíricas para obtenção de parâmetros como o comprimento, área e volume do fluxo de detritos (RICKENMANN e ZIMMERMANN, 1993; COROMINAS, 1996; SCHEIDEGGER, 1973), ou área transversal e de deposição (SHEICL e RICKENMANN, 2010).

Os modelos empíricos geralmente utilizam menor quantidade de dados de entrada e são mais facilmente aplicados em escala regional. Horton et al. (2013) criaram um dos modelos empíricos mais difundidos, *Flow Path Assessment of Gravitational Hazards at a Regional Scale* (Flow-R) com aplicação em SIG, utilizado em diversas análises de suscetibilidade e risco a fluxos de detritos (XU et al., 2022;). O modelo é baseado em algoritmos de direção de fluxo e funções inerciais, a fim de definir potenciais áreas de iniciação do movimento e delimitar áreas afetadas pelo fluxo de detritos. Algumas limitações do modelo trazidas por Kang e Lee (2018) incluem negligenciar fatores controladores locais, como propriedades reológicas e dos materiais. Ademais, o modelo não considera massa e volume do movimento e não é recomendado para aplicação em eventos individuais. Ainda assim, o modelo traz bons resultados, sendo aplicado em diversos estudos (KAPPES et al., 2011; FISCHER et al., 2012; PARK et al., 2016; PASTORELLO et al., 2017), e alcançando taxas de verdadeiro positivo de até 83.5% (MELO e ZÊRERE, 2017).

Com o propósito de suprir as limitações relacionadas à desconsideração do volume do fluxo de detritos, e principalmente, das variações de volume do movimento a partir da origem, Reid et al. (2016) criaram um modelo empírico para análise de áreas inundadas por fluxos de detritos, considerando uma ampliação do volume. O modelo é baseado em relações de área afetada e área da seção transversal em função do volume, e requer a definição das áreas de iniciação, de um volume de origem, e alguns parâmetros de calibração, como a taxa de incremento do volume. Essa taxa de incremento é dada em função da área de contribuição ou do comprimento do canal a montante. A utilização desse método, em função da área de contribuição, permite representar a ocorrência de fluxos de detritos múltiplos e fluxos ocorridos a montante, gerando um incremento abrupto do volume em função da maior área de contribuição.

O modelo considera o incremento do volume do fluxo a partir de uma área de contribuição mínima, de 1500 m<sup>2</sup>, e usa o valor da declividade do canal para definir a interrupção desse aumento, considerando os valores de 5° e 10°. A Figura 17 apresenta os resultados da simulação de Reid et al. (2016) para uma região afetada por fluxos de detritos em Óregon, nos Estados Unidos. Além de considerar as zonas de transporte do fluxo, com a propagação já como uma inundação de detritos, a simulação resulta em uma análise sobre toda a rede de drenagem, impossibilitando a sua aplicação para os fluxos de encosta aberta.

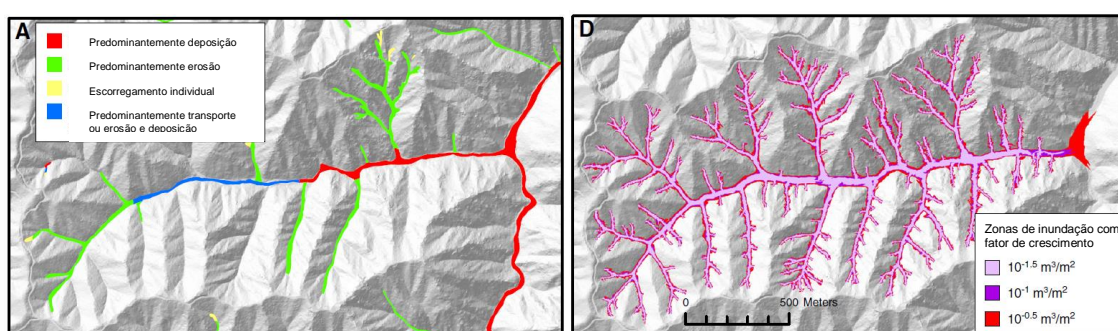


Figura 17. A. Área afetada pelo fluxo de detritos. D. Simulação do modelo proposto por Reid et al. (2016). Adaptado de Reid et al. (2016).

A nova metodologia de suscetibilidade a fluxos de detritos adotada pela CPRM a partir do Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Riscos em Desastres Naturais (GIDES), também é descrita como uma abordagem empírica, baseada na topografia e morfometria da bacia (FACURI e PIKANÇO, 2021). A metodologia consiste em diversos passos de análises morfométricas de bacias potenciais, onde são estabelecidos limiares para definição da área crítica, associada à iniciação do movimento em canais de primeira, e da área de dispersão, em função do espalhamento do fluxo nas áreas de menor declividade. São classificadas como bacias potenciais as bacias com área de contribuição igual ou superior a 1 ha, drenagem em vale confinado e linha de talvegue com inclinação média de no mínimo 10°. A condição de confinamento das bacias é expressa na Figura 18, onde o comprimento do talvegue é maior que a sua largura. Se a condição não for satisfeita, o modelo para análise de suscetibilidade a fluxos de detritos não é aplicado.



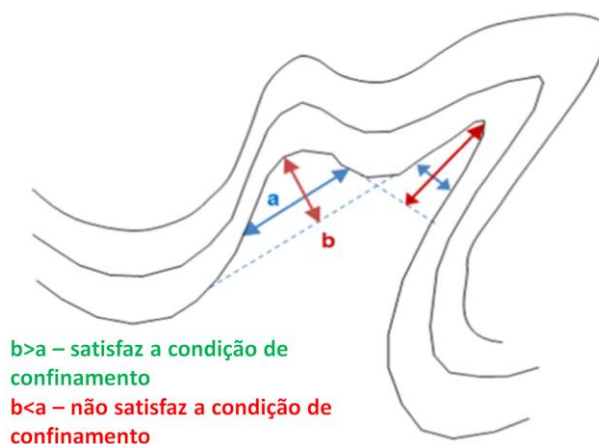


Figura 18. Condição de confinamento para aplicação do modelo. Adaptado de Facuri e Picanço (2021).

A maior limitação associada aos modelos empíricos é a utilização direta apenas em condições semelhantes às quais foram elaborados, e necessitam de uma grande quantidade de dados observados, para calibrar e validar o modelo. Por conseguinte, quando não especificadas as condições de aplicação do modelo, incluindo o grau de confinamento do fluxo e o material envolvido, a reprodução das metodologias propostas e o próprio uso dos modelos empíricos pode se tornar questionável.

Conforme Guinau et al. (2007), em muitos países a escassez de recursos, de dados de qualidade e de pessoas especializadas constitui uma forte desvantagem para a análise de risco e suscetibilidade a movimentos de massa. Por conseguinte, para algumas finalidades, a utilização de modelos empíricos de aplicação em grande escala pode ser vantajosa em função da facilidade de uso e da redução na quantidade de parâmetros necessários. Dessa forma, a incerteza trazida pelos modelos empíricos, associada à própria metodologia, de certa forma é compensada pela redução das incertezas associadas a uma grande quantidade de parâmetros.

### 3.5. Síntese da Revisão

O fluxo de detritos é um dos mais perigosos e com maior capacidade de causar danos entre os diferentes movimentos de massa gravitacionais (HUNGR, 1995). A principal origem dos fluxos de detritos está associada aos escorregamentos translacionais, particularmente aos escorregamentos completamente transformados em fluxos, que seguem por longas distâncias com elevado potencial destrutivo. Além

da composição de material e da proporção de água e sedimentos, as condições e características de iniciação, transporte e deposição dos fluxos de detritos refletem em diferentes comportamentos de propagação. A principal classificação separa os fluxos de detritos em canalizados e de encosta aberta, considerando ainda um grupo de transição.

Entre cada grupo da classificação são identificados padrões significativos nos parâmetros morfométricos e geomorfológicos, embora a variabilidade do movimento resulte em discrepâncias entre análises de diferentes localidades, especialmente em função da mistura de material do fluxo, e até mesmo devido a divergências na utilização das terminologias. A incompatibilidade entre as descrições do movimento, e até mesmo a ausência de classificações, no tocante ao grau de confinamento do fluxo e a predominância de material, são consideradas uma das principais razões para as discordâncias nos resultados. Por conseguinte, embora a distinção da transição entre os tipos de fluxo, quanto ao grau de confinamento, não ser claramente reconhecida (GUTHRIE et al., 2010), critérios de separação facilitam tanto na identificação do evento quanto na utilização e desenvolvimento de modelos para análises de suscetibilidade.

Enquanto modelos fisicamente embasados apresentam forte sensibilidade à escolha dos parâmetros e dados de entrada, os modelos empíricos resultam quase que exclusivamente do banco de dados, de forma que seu uso é exclusivo de regiões e movimentos de mesma classificação e caracterização. Essa condição define a maior limitação do uso de modelagem empírica, especialmente quando a própria classificação e caracterização desses modelos acabam sendo negligenciadas. Em vista disso, a contribuição dessa pesquisa é em discretizar os diferentes tipos de fluxos de detritos, quanto ao grau de confinamento, propondo um modelo empírico simplificado para análise de suscetibilidade, considerando diferentes cenários de aplicação.

## 4. ÁREA DE ESTUDO

### 4.1. Bacia do Rio Mascarada

A base de dados foi obtida a partir dos movimentos de massa ocorridos na bacia do rio Mascarada, localizada no Estado do Rio Grande do Sul entre os municípios de São Francisco de Paula, Rolante e Riozinho (Figura 19). A bacia tem uma área de aproximadamente 320 km<sup>2</sup>, com variação altimétrica de mais de 900 metros. O rio Mascarada tem como principais afluentes os arroios Areias e Riozinho, e apresenta trechos bem encaixados, com seções delimitadas por paredões rochosos (Figura 20). O rio Mascarada desagua no rio Rolante, que é um dos principais afluentes do rio dos Sinos, cuja bacia abrange 32 municípios da região nordeste do Rio Grande do Sul.

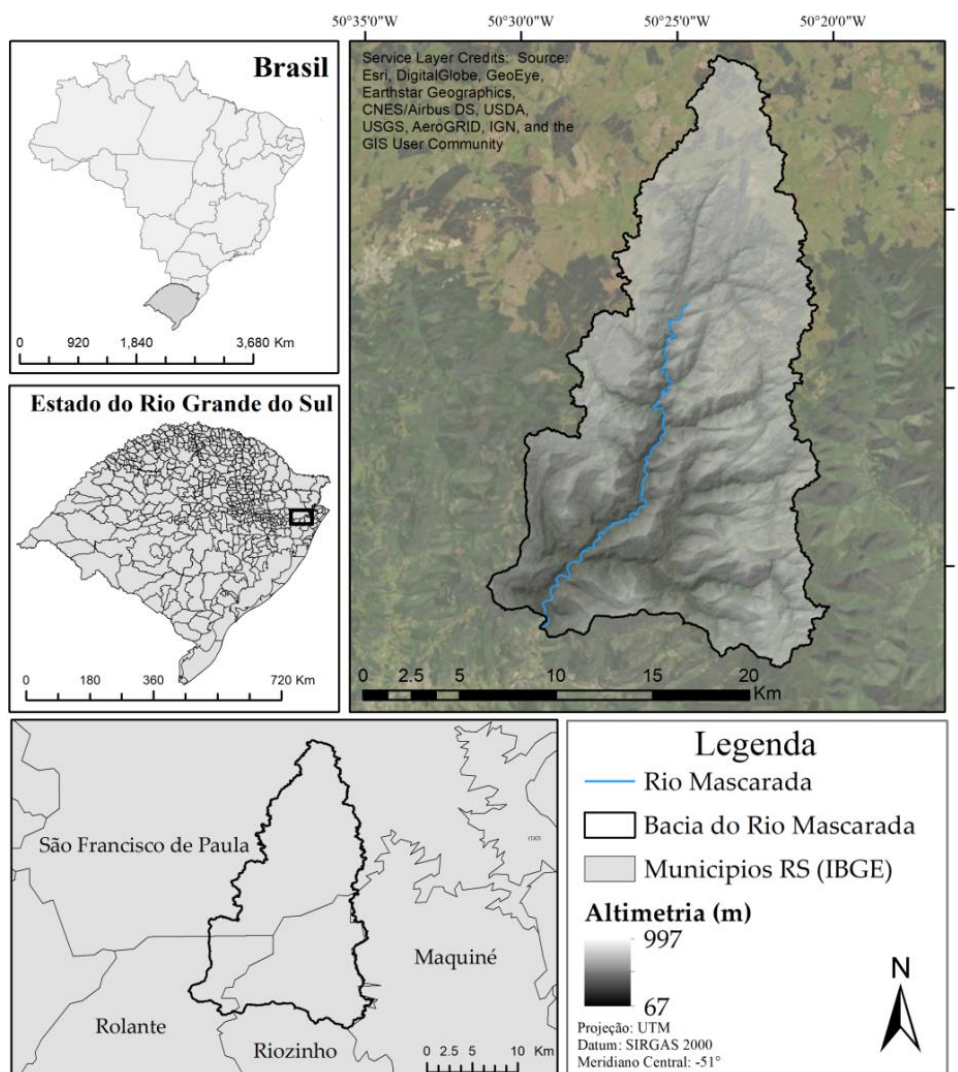


Figura 19. Localização da bacia do rio Mascarada.

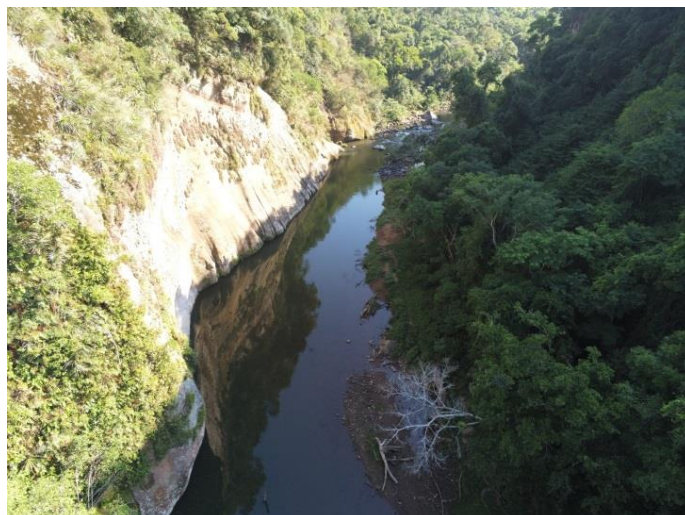


Figura 20. Trecho de seção do rio Mascarada.

A bacia do rio Mascarada é considerada predominantemente rural, com mais de 70% da área coberta por florestas, entre áreas de mata nativa e silvicultura, que predominam sobre as áreas de maior declividade (Figura 21). Cerca de 20% da área da bacia é destinada às atividades de agropecuária, essencialmente sobre os campos de cima de serra, nas áreas de maior elevação onde predomina um relevo levemente ondulado. As áreas de maior urbanização na bacia correspondem à região próxima ao exutório, sobre o município de Rolante, e algumas residências mais espaçadas ao norte da bacia em São Francisco de Paula e nordeste sobre a localidade Rincão dos Kroeff.

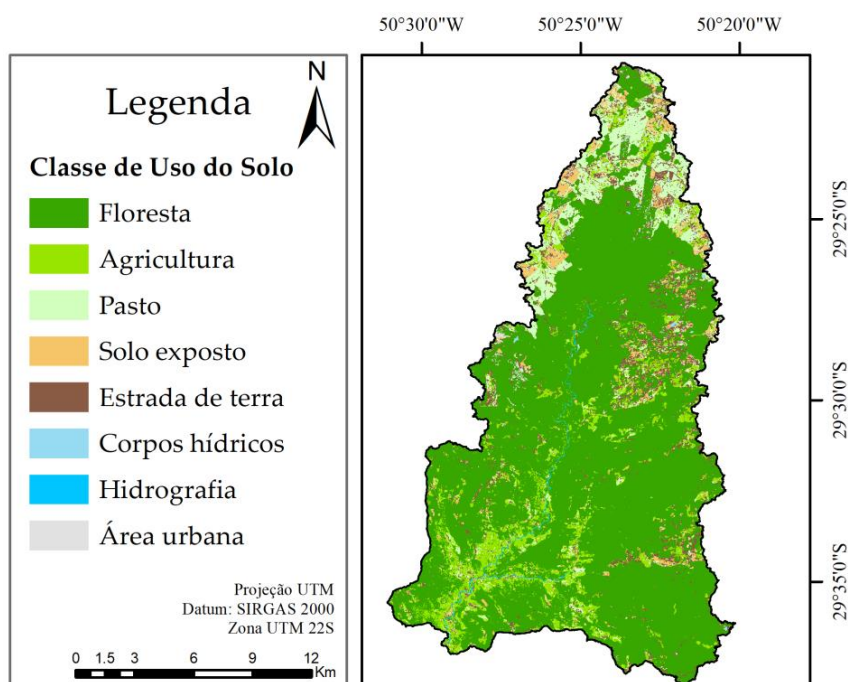


Figura 21. Mapa de uso e ocupação do solo referente ao ano de 2018.

A área da bacia apresenta características de transição entre o Planalto de cima da Serra e a Planície Costeira do Rio Grande do Sul, naturalmente favorecendo uma condição de instabilidade geomorfológica (DANTAS et al., 2010), com encostas escarpadas e elevadas declividades (Figura 22a). A área com maior ocorrência de movimentos de massa coincide próxima à interface entre as fácies Palmas/Caxias e Gramado da formação Serra Geral (Figura 22b), sobretudo na região de derrames básicos das fácies Gramado, onde as rochas são predominantemente basálticas e mais suscetíveis à erosão em relação às rochas ácidas. E na região próxima ao exutório, são encontrados arenitos da formação Botucatu e depósitos aluviais e coluviais (CPRM, 2006). Os solos na maior parte da bacia são do tipo Neossolo Litólico ou Cambissolo Humico (SANTOS et al., 2013), caracterizados por solos mais rasos e de transição, geralmente associados as áreas mais declivosas, próximo ao exutório da bacia, uma pequena parcela formada por argissolo (Figura 22c).

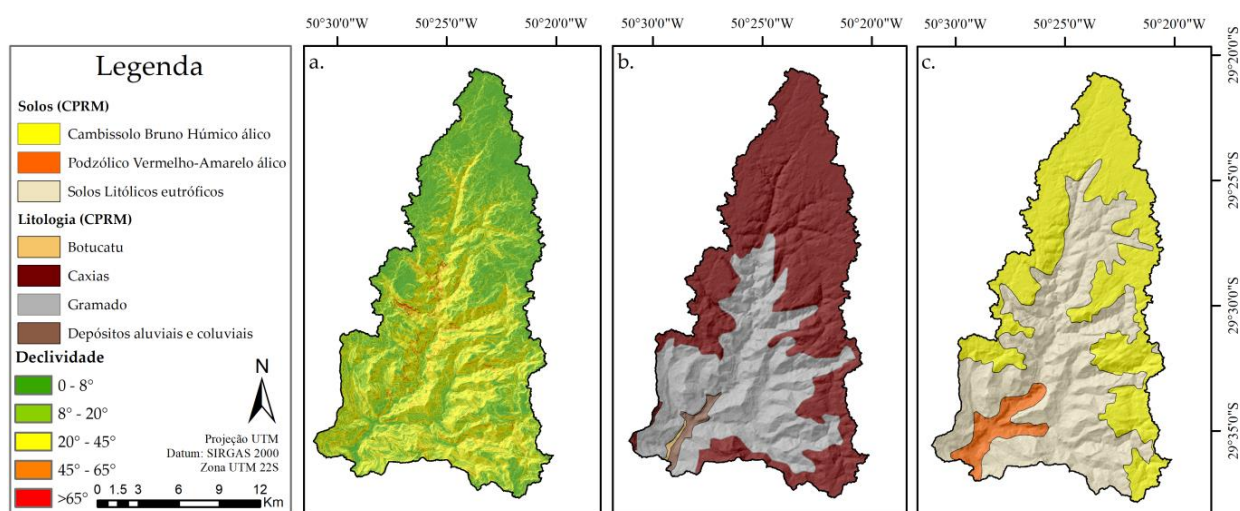


Figura 22. Mapas de Declividade (a), Litologia (b) e Solo (c) da bacia do rio Mascarada.

A bacia do rio Mascarada sofreu um evento de precipitação extrema em janeiro de 2017, com chuvas intensas e concentradas na região de cabeceira da bacia. Até o momento do evento não haviam estações oficiais de monitoramento na bacia, apenas nas proximidades, que registraram valores bem discrepantes ao estimado para a região afetada. Medições não oficiais de agricultores locais registraram até 270 mm de precipitação em poucas horas, enquanto que próximo ao exutório da bacia o cenário de precipitação era bem reduzido. O evento resultou na

deflagração de diversos movimentos de massa sobre o município de São Francisco de Paula, em particular escorregamentos e fluxos de detritos (Figura 23).



Figura 23. Cicatrizes dos movimentos de massa ocorridos em 2017.

Conforme Guirro (2020), ainda é considerada a possibilidade de formação de uma barragem natural pelo acúmulo de material das encostas no vale encaixado. O rompimento da barragem teria ocasionado a formação de uma inundação de detritos, atingindo o município de Rolante a jusante da bacia do rio Mascarada. O evento não gerou mortes, mas grande parte da população foi afetada. Além disso, a elevada carga de sedimentos nos cursos d'água elevou o nível de turbidez, impossibilitando o abastecimento de água nas cidades a jusante até o município de Canoas, na região metropolitana de Porto Alegre. Após a ocorrência do evento de 2017 foi gerado um Modelo Digital do Terreno (MDT) AW3D de 1 metro de resolução, adquirido pela *NTT DATA Corporation*, gerado através da combinação de múltiplas imagens de alta resolução obtidas por satélites *DigitalGlobe*.

#### **4.2. Estudos desenvolvidos na bacia do rio Mascarada**

A grande dimensão do evento ocorrido em dezembro de 2017 chamou a atenção para a região da bacia do rio Mascarada. Logo após a ocorrência do evento o Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN /UFRGS) em conjunto com o DRH/SEMA, com apoio do corpo de bombeiros, realizaram trabalhos de campo na

região para emissão de relatório técnico (SEMA, 2017). O relatório pós-desastre auxiliou no esclarecimento dos processos ocorridos no evento, especialmente para a população local que levantava diversas hipóteses sobre o acontecimento, como o rompimento de açudes de propriedades locais ou represas – que sequer existem na região. O efeito sobre a população após a ocorrência do desastre foi retratado por Cornely et al. (2019), apontando a dimensão das possíveis consequências em uma sociedade.

Um evento de proporção similar ocorreu na década de 40, concentrando as maiores fatalidades sobre o município de Riozinho, mas em geral, já foi esquecido pela população. Nesse sentido, Paixão et al. (2018) levantaram algumas lições obtidas com o evento, onde destaco a gestão integrada e participativa na prevenção dos desastres. A ausência de mortes no evento de 2017, bem como o desempenho e o desenvolvimento do município de Rolante quanto à resposta, recuperação, prevenção e preparação de desastres só foi possível pela cooperação com os municípios da região e o apoio da comunidade local.

A iniciativa de estudos na região deu continuidade com a instalação de estações de monitoramento na bacia do rio Mascarada e com pesquisas realizadas na área. Cardozo et al. (2021), Scharz (2019) e Cardozo et al. (2018) desenvolveram estudos na obtenção de inventários, pela delimitação e caracterização das cicatrizes. Scharz (2019) propôs uma metodologia semi-automatizada para delimitação das cicatrizes, comparando os resultados com o inventário de cicatrizes manualmente delimitadas (CARDOZO et al., 2018). Ambos os trabalhos ainda trouxeram diferentes metodologias de caracterização das cicatrizes, considerando diferentes métricas e parâmetros morfométricos e geomorfológicos. A utilização de diferentes inventários de cicatrizes reflete em algumas variações na comparação dos resultados.

Pesquisas voltadas a modelagem dos processos desencadeados no evento são apresentadas por Guirro (2020), considerando a hipótese de formação de barragens naturais, e por Paul (2020), simulando alguns fluxos de detritos do evento como estudo de caso para um novo modelo fisicamente embasado. Os fluxos de detritos simulados por Paul (2020) foram comparados com os resultados do modelo proposto neste trabalho.

Por último, outras pesquisas desenvolvidas na região da bacia do rio Mascarada são direcionadas para conectividade hidrossedimentológica (ZANANDREA et al., 2019; ZANANDREA et al., 2020a; ZANANDREA et al., 2020b; ABATTI, 2021).

Eventos extremos como fluxos de detritos, podem modificar a dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica, mas principalmente são influenciados pela própria conectividade da bacia. Zanandrea et al. (2021) utilizaram o registro de fluxos de detritos ocorridos na bacia do rio Mascarada para verificação dos valores obtidos de índice de conectividade hidrossedimentológica. Os autores identificaram zonas de deposição dos fluxos de detritos, apontadas como áreas desconectadas do exutório da bacia durante o evento de deflagração dos fluxos. Nas áreas com maiores índices de conectividade hidrossedimentológica constataram a ocorrência de fluxos de detritos que atingiram o canal de drenagem, fornecendo grande aporte de sedimentos das partes mais elevadas da bacia para serem transportadas no canal, como evidência foi identificada o depósito de sedimentos nas margens do rio.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas da metodologia estão resumidas no fluxograma da Figura 24. A metodologia consiste inicialmente no mapeamento e na caracterização de cicatrizes de movimentos de massa ocorridos na bacia do rio Mascarada, uma bacia predominantemente florestada na região sul do Brasil. A caracterização das cicatrizes é separada entre parâmetros morfométricos que caracterizam o próprio formato e delimitação da cicatriz, e parâmetros geomorfológicos que envolvem características da encosta em que ocorreram. Com os parâmetros obtidos são feitas análises estatísticas buscando identificar correlações e variáveis de maior peso na representação das cicatrizes.

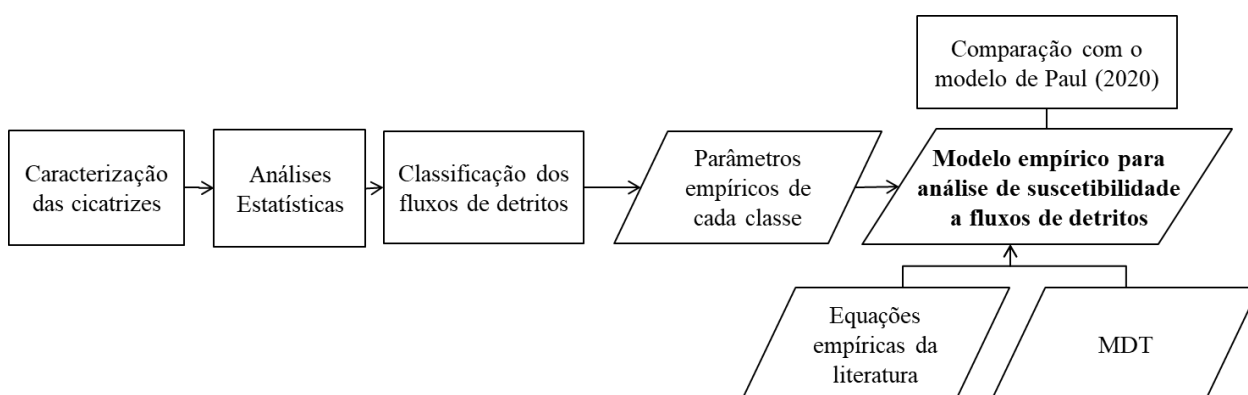


Figura 24. Fluxograma de etapas da metodologia proposta.



Além disso, a partir da delimitação e caracterização das cicatrizes são propostas classificações com base na mobilidade e no comportamento de propagação dos fluxos de detritos, que refletem em diferentes abordagens para modelagem e análise de suscetibilidade do movimento. É proposto um modelo empírico, com base em geoprocessamento, com abordagens complementares e que diferem quanto aos tipos de grau de confinamento do fluxo de detritos. Além do MDT e da definição das áreas de origem, o modelo requer a definição de três parâmetros empíricos do movimento.

Para a obtenção de um desses parâmetros de entrada do modelo, a profundidade do fluxo de detritos, é proposta uma relação empírica, resultante da associação de equações empíricas já propostas na literatura. Essa relação resulta em uma estimativa da profundidade do fluxo, para fluxos de detritos canalizados, obtida em função do volume e da declividade. O modelo é aplicado como estudo de caso em quatro encostas da bacia do rio Mascarada, sendo comparados alguns resultados com um modelo simplificado e fisicamente embasado proposto por Paul (2020). Utilizando os parâmetros definidos com base na caracterização das cicatrizes e na aplicação do modelo nessas quatro encostas, o modelo é aplicado em todas as cicatrizes da bacia do rio Mascarada.

### **5.1. Caracterização das Cicatrizes**

As cicatrizes foram delimitadas a partir de imagens de satélites, e sua caracterização foi feita por geoprocessamento com a utilização dos softwares ArcGis 10.4 e QGIS 7.8. Algumas variáveis foram comparadas com medições e validações em campo, com utilização de trena e GPS. Para cada cicatriz foram obtidas as seguintes variáveis:

- área total (A);
- perímetro (P);
- comprimento (L);
- largura (w);
- ângulo de alcance ( $\alpha$ );
- fator de forma (FF);
- coeficiente de compacidade ( $K_c$ );

- declividades mínima, média e máxima (S);
- curvatura do plano e do perfil;
- elevação;
- orientação;
- distância de rios;
- distância do divisor de águas;
- área de contribuição ( $A_c$ );
- ordem de Strahler dos canais.

### 5.1.1. Delimitação das Cicatrizes

As cicatrizes da bacia do rio Mascarada foram mapeadas manualmente a partir de imagens de satélite do Google Earth obtidas após o evento de 2017 até o ano de 2019, sem diferenciação da área de ruptura e de propagação. Fluxos de detritos múltiplos foram inicialmente mapeados como uma única cicatriz, e posteriormente segmentados em todos os trechos de junção ou separação de propagação do fluxo. A fim de validar a delimitação das cicatrizes, em alguns pontos de acesso, na maior parte próxima as áreas de origem, foram medidas as larguras em campo a fim de comparar o erro associado na delimitação e caracterização desses parâmetros (Figura 25).



Figura 25. Medições de largura das cicatrizes.

### 5.1.2. Análises Morfométricas

As variáveis morfométricas obtidas para cada cicatriz estão representadas na Figura 26. As variáveis de área e perímetro foram obtidas diretamente a partir das ferramentas de geoprocessamento. Já para a delimitação do comprimento das cicatrizes foi traçado manualmente uma linha central a partir do ponto de maior elevação, seguindo o percurso de direcionamento longitudinal do fluxo, buscando manter uma direção paralela com as margens da delimitação da cicatriz, até atingir o ponto de menor elevação do terreno dentro da cicatriz. A partir dessa linha central foram geradas linhas transversais a cada 20 metros de distância, a partir das quais foram medidas as larguras da cicatriz. O espaçamento de 20 metros foi também considerado em análise de seções transversais de fluxos de detritos por Imaizumi et al (2006). Por conseguinte, cada cicatriz partindo da origem é formada por uma sequência de trechos de 20 metros de comprimento, sendo o último trecho, com comprimento inferior a 20 metros, desconsiderado nas análises, justamente por conter muitas incertezas quanto ao final da delimitação da área atingida. Para cada trecho foram calculadas as áreas parciais e acumuladas a montante na cicatriz.

Para analisar o formato das cicatrizes foram ainda calculados dois coeficientes, o coeficiente de compacidade (Equação (48)) e o fator de forma (Equação (27)). O fator de forma foi calculado em função da área e do comprimento, enquanto que o cálculo do fator de forma em função da área seria feito com base em um valor médio e menos representativo do formato geral da cicatriz.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (48)$$

Além do alcance do fluxo de detritos com base no comprimento da cicatriz, para cada cicatriz individualmente foi calculado o ângulo de alcance. O valor do ângulo de alcance é obtido pela diferença de elevação dos pontos nos extremos da cicatriz, de origem e deposição, e pela distância horizontal entre esses pontos. O valor de elevação é estimado considerando uma interpolação bilinear das células adjacentes de um ponto inicial na cabeceira da cicatriz, e a distância é calculada horizontalmente entre os dois pontos de extremos da cicatriz. A Figura 26 apresenta

as variáveis morfométricas obtidas para cada cicatriz analisada, considerando uma representação de um fluxo de detritos.

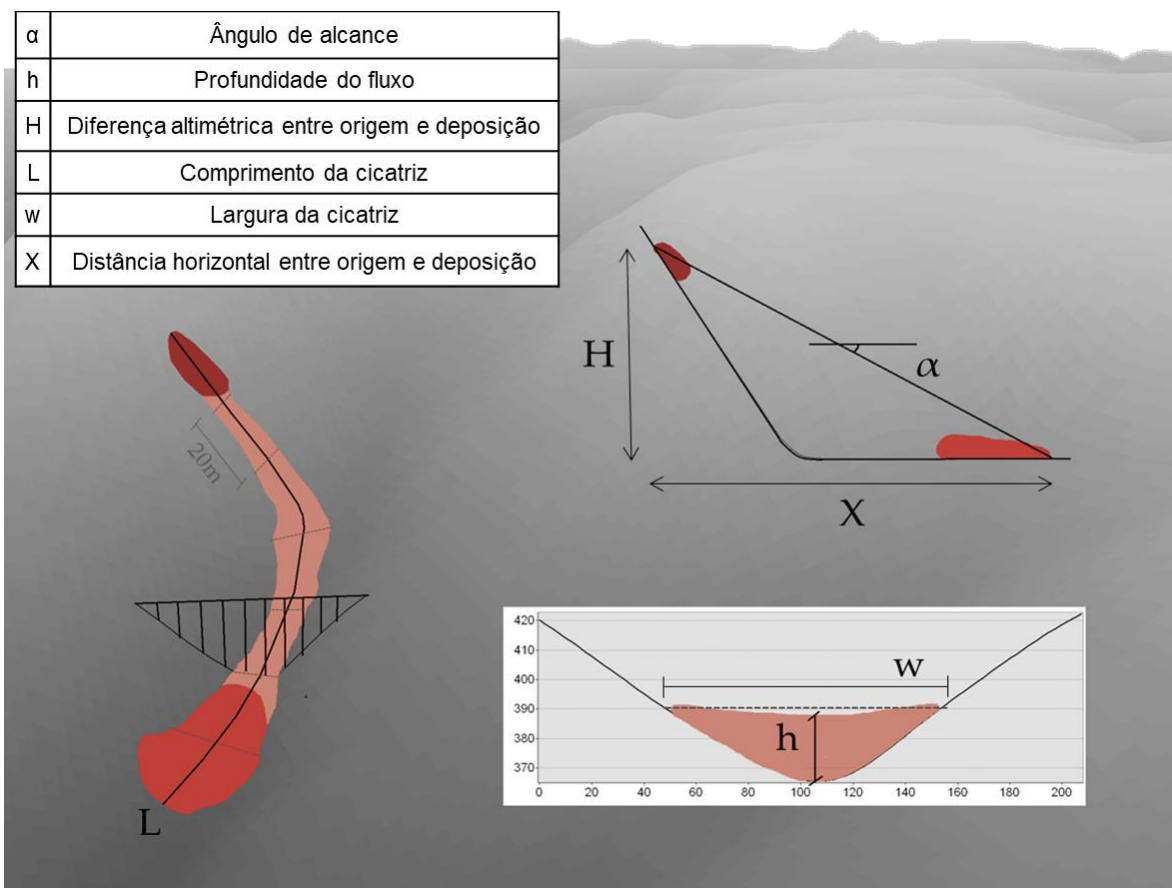


Figura 26. Representação das variáveis morfométricas da cicatriz.

### 5.1.3. Análises Geomorfológicas

As variáveis geomorfológicas foram obtidas essencialmente a partir do MDT, considerando a área de toda cicatriz ou particularizando cada trecho (20 metros de comprimento). As curvaturas e a declividade da cicatriz foram calculadas pelo valor médio da área total, sendo calculado o valor por pixel em um MDT reamostrado com 10 metros de resolução, a fim de melhor representar a área de toda a cicatriz, e reduzir a variabilidade pontual desses parâmetros.

A classificação dos valores de curvatura foi feita considerando valores positivos de curvatura do perfil como encosta côncava e valores negativos indicando um formato convexo. Para a curvatura do plano os valores negativos indicam uma convergência do terreno, e valores positivos representam uma vertente divergente.

Por sua vez, valores nulos de curvatura, em ambos os casos, indicam uma superfície linear e uma vertente retilínea, respectivamente. No entanto, apesar dessa classificação, Valeriano e Junior (2003) apontam que muito pouco do que é classificado como retilíneo apresenta de fato uma curvatura nula, de forma que cabe interpretar nessa classe uma faixa de tolerância, considerando ainda as imprecisões dos dados levantados e do processamento digital. Assim, foi considerada a faixa de -0.5 a 0.5 como curvatura plana, em ambas as condições do perfil e do plano.

O valor de elevação associado às cicatrizes foi obtido pelo valor médio dentro do primeiro trecho dos 20 metros iniciais, e a área de contribuição pelo valor máximo nesse mesmo trecho, considerando o método de infinitas direções de fluxo (TARBOTON, 1997). A distância até o divisor de águas foi obtida pelo valor mínimo do primeiro trecho, e a distância até o canal pelo valor mínimo do primeiro e do último trecho da cicatriz, considerando a menor distância do caminho pela superfície, seguindo o método de infinitas direções de fluxo.

Além disso, foi identificada dentro de cada cicatriz a maior ordem de rio segundo a classificação de Strahler. Foi utilizado o MDT de 1 metro de resolução considerando dois cenários, uma classificação dos rios com área de contribuição a partir de  $2 \cdot 10^4$  m<sup>2</sup>, e uma classificação sem utilizar um limiar de área de contribuição. As distâncias de cada cicatriz até o canal foram feitas utilizando o segundo cenário, sendo estipulado a existência dos canais a partir da ordem 9 da classificação, de aproximadamente  $10^6$  m<sup>2</sup> de área de acumulação.

A Tabela 13 apresenta um resumo das características analisadas em cada grupo, juntamente com o método utilizado na análise.

Tabela 13. Características estimadas para cada cicatriz.

<b>Grupo</b>	<b>Característica</b>	<b>Metodologia</b>
<b>Análises Morfométricas</b>	Área total (A);	Obtido diretamente da cicatriz
	Perímetro (P);	Obtido diretamente da cicatriz
	Comprimento (L);	Traçado manualmente
	Largura (w);	Média entre transversais ao comprimento (cada 20m)
	Ângulo de alcance ( $\alpha$ );	Diferença altimétrica e distância horizontal entre os pontos mais a montante e jusante da cicatriz

Análises Geomorfológicas	Fator de forma (FF);	Equação (27)
	Coeficiente de compacidade ( $K_c$ );	Equação (48)
	Declividade (mín, méd, max) (S);	Obtido diretamente pela área de toda a cicatriz
	Curvatura do plano e do perfil;	Obtido diretamente pela média em toda a cicatriz
	Elevação;	Média dentro dos primeiros 20m na área da cicatriz
	Orientação;	Direção majoritária das células na área da cicatriz
	Distância de rios;	Distância mín. a partir do trecho dos primeiros 20 m, e dos últimos 20 m da cicatriz
	Distância do divisor de águas;	Distância mín. do ponto mais a montante da cicatriz ao divisor de águas
	Área de contribuição ( $A_c$ ).	Média dentro dos primeiros 20m na área da cicatriz
	Ordem de Strahler (Canais)	Limiar de $2 \cdot 10^4$ , MDT de 1m
	Ordem de Strahler (MDT)	Ausência de limiar, MDT de 1m

## 5.2. Classificações

Embora os fluxos de detritos sejam diferenciados conceitualmente, existem poucas metodologias que permitam classificá-los de maneira objetiva. Em vista disso, foram propostas metodologias de classificação das cicatrizes dos fluxos de detritos ocorridos na bacia do rio Mascarada, referentes a hierarquia de fluxos de detritos múltiplos, ao grau de confinamento e grau de desenvolvimento. A classificação hierárquica segmenta os fluxos de detritos múltiplos e classifica cada trecho conforme a hierarquia de rios proposta por Horton (1945). O grau de desenvolvimento é associado ao alcance de mobilidade do fluxo, enquanto que a classificação referente ao grau de confinamento difere as cicatrizes dos fluxos de detritos canalizados e de encosta aberta.

### 5.2.1. Classificação pela Hierarquia de Fluxos de Detritos

Grande parte das cicatrizes dos movimentos ocorridos na região são fluxos de detritos múltiplos, os quais ocorrem a partir de diferentes origens e apresentam pontos de junção ou repartição durante o trajeto de propagação. A partir dessa observação, onde o formato múltiplo das cicatrizes recorda de certa forma uma rede de drenagem foi desenvolvido um sistema de classificação hierárquica para as cicatrizes baseado na classificação de Horton (1945). Em um fluxo de detritos múltiplo que apresenta diferentes pontos de iniciação convergindo para um mesmo trajeto, o fluxo de maior comprimento a partir da origem até o ponto de maior alcance é classificado como principal fluxo de detritos, e, portanto de maior ordem. A segmentação da cicatriz de fluxos múltiplos é feita com uma linha transversal ao direcionamento do fluxo sobre a área de confluência, descontinuando o fluxo de menor ordem.

Os trechos de iniciação do fluxo até a primeira confluência são classificados como fluxos de primeira ordem, da mesma forma, fluxos de detritos individuais são todos de ordem 1. A junção de dois fluxos de mesma ordem resulta em uma ordem imediatamente superior, estendida até a origem do fluxo de maior comprimento. A Figura 27 exemplifica um fluxo de detritos múltiplo com a ordem de classificação de cada trecho da cicatriz. Fluxos que apresentam uma separação do trecho a jusante, mantem em ambos os trechos a mesma ordem de classificação, no entanto é considerado como parte do fluxo principal o trecho de maior comprimento.

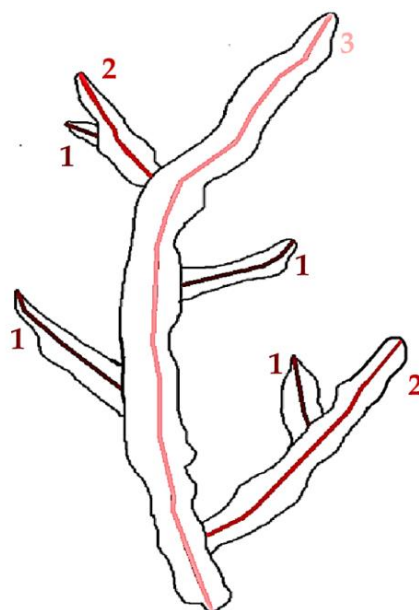


Figura 27. Classificação dos fluxos de detritos múltiplos com base em Horton (1945).

Em conjunto com a classificação das cicatrizes foram aplicados alguns índices de análise morfométrica, considerados para caracterização de bacias hidrográficas. A metodologia segue as etapas de análise areal descritas em Christofolletti (1980), com base nas leis inicialmente propostas por Horton (1945). Analogamente às relações estimadas para canais em bacias hidrográficas, conforme 1ª Lei de Horton (1945), foram calculadas as Relações de Bifurcação ( $R_b$ ) (Equação (53), que representam a razão entre cicatrizes de uma ordem ( $N_u$ ) e o número de cicatrizes de uma ordem imediatamente superior ( $N_{u+1}$ ). Com base na 2ª Lei de Horton (1945), dada em função dos comprimentos dos canais de drenagem, foi calculada a Relação do Comprimento Médio ( $RL_m$ ) (Equação (54), a qual estabelece a relação entre o comprimento médio das cicatrizes de determinada ordem ( $L_m$ ), em função do comprimento médio de cicatrizes de uma ordem imediatamente inferior ( $L_{m-1}$ ). A 3ª Lei de Horton (1945), referente à declividade dos canais, sugere a Relação do Gradiente ( $R_g$ ) (Equação (51), que estabelece a relação entre declividade média das cicatrizes de uma dada ordem ( $S_u$ ), sobre a declividade média das cicatrizes de uma ordem imediatamente maior ( $S_{u+1}$ ). Por último, a densidade de drenagem, a qual representa em uma bacia o grau de desenvolvimento da rede de drenagem, é descrita como densidade de cicatriz ( $D_c$ ) (Equação (52), representando a incidência e abrangência dos fluxos de detritos em uma bacia hidrográfica pela relação o número total de cicatrizes ( $N_i$ ) e a área de influência das cicatrizes ( $A_i$ ). A área de influência é definida por Zanandrea et al. (2018) como o somatório das áreas dos



círculos formados a partir do centroide de cada cicatriz, onde o raio é dado pela distância do centroide até o ponto mais distante da cicatriz, considerado como o vértice no final da delimitação do fluxo de detritos.

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad (49)$$

$$RL_m = \frac{L_m}{L_{m-1}} \quad (50)$$

$$R_g = \frac{S_u}{S_{u+1}} \quad (51)$$

$$D_c = \frac{N_t}{A_i} \quad (52)$$

### 5.2.2. Grau de Desenvolvimento

O grau de desenvolvimento do fluxo de detritos descreve a evolução do movimento, em termos de estruturação das etapas de formação. Takahashi (2014) descreve que um fluxo de detritos completamente desenvolvido tem seu crescimento suspenso, sedimentos bem distribuídos em toda a profundidade do fluxo, e o movimento não apresenta mais capacidade de erosão do leito. Em seguida, embora o fluxo possa seguir a propagação em uma condição sem erosão ou deposição, com redução da declividade eventualmente os maiores blocos de sedimento acabam depositando, formando uma zona de deposição. Assim, fluxos completamente desenvolvidos são considerados aqueles que permitem identificar as três etapas bem desenvolvidas da formação do fluxo de detritos, origem, transporte e deposição, mesmo que a interface entre elas não seja bem estabelecida.

A classificação proposta para os fluxos de detritos, com base em Hurlimann et al. (2015), diferencia conceitualmente os seguintes grupos: i) fluxos de detritos não desenvolvidos, ii) fluxos de detritos parcialmente desenvolvidos e iii) fluxos de detritos completamente desenvolvidos. A substituição dos termos da classificação de Hurlimann et al. (2015) resulta da interpretação de que fluxos não desenvolvidos não representam necessariamente escorregamentos translacionais não transformados em fluxos, mas fluxos de detritos que não atingiram grande mobilidade ou que são parte de fluxos de detritos múltiplos, onde acabam inseridos e incorporados por fluxos de maior ordem. Apesar de classificados como não desenvolvidos, ainda

podem representar uma relevante contribuição no alcance e na área afetada da cicatriz do fluxo principal, embora a dimensão dessa influência seja difícil de ser estimada.

Embora a evolução a partir de escorregamentos translacionais seja reconhecida como uma das origens de fluxos de detritos, a diferenciação desse trecho de transformação ou a própria classificação de um movimento como um fluxo ou como um escorregamento não apresenta limiares bem definidos. A principal diferença entre os dois movimento é apresentada pela mobilidade do movimento, onde os escorregamentos acabam próximos às zonas de deflagração, e os fluxos de detritos acabam atingindo maior desenvolvimento. Essa condição resulta tanto das características da encosta, possibilitando a evolução do movimento, quanto da disponibilidade de material a ser erodido em conjunto com a presença de água.

O registro de Ellen e Fleming (1987) descreve fluxos de detritos variando entre algumas dezenas de metros até por mais de quilômetro. Portanto, de maneira arbitrária foi estipulada uma distância mínima de 60 metros para classificar as cicatrizes como fluxos de detritos desenvolvidos, parcialmente ou completamente. As cicatrizes da bacia do rio Mascarada com menos de 60 metros foram classificadas como fluxos de detritos não desenvolvidos.

Por sua vez, a diferenciação entre o grau de desenvolvimento, parcial ou completo, está atrelada à propagação do fluxo e às condições de morfologia, confinamento e obstrução da própria encosta. Para os fluxos de encosta aberta, essa separação do grau de desenvolvimento seria identificada por uma obstrução do terreno e do próprio trajeto de propagação do fluxo. No entanto, o comportamento esperado do fluxo de detritos de encosta aberta parcialmente ou completamente desenvolvido segue um mesmo padrão, não resultando em diferenças significativas de propagação, apenas na continuidade do movimento.

No entanto, fluxos canalizados em geral apresentam a zona de deposição no formato de leques aluviais, de forma que, os fluxos de detritos que seguem propagados pelo canal, mesmo na forma de inundação de detritos, são considerados parcialmente desenvolvidos. E apenas os fluxos de detritos com uma zona de deposição na forma de leques aluviais, são considerados fluxos de detritos canalizados completamente desenvolvidos.

### **5.2.3. Classificação dos Tipos de Fluxo de Detritos quanto ao Grau de Confinamento**

A classificação entre os graus de confinamento, diferenciando fluxos de detritos entre canalizados ou de encosta aberta, é na maioria das vezes estipulada por metodologias heurísticas e pouco descritas. As classificações são feitas visualmente, geralmente em campo, o que incorpora grande nível de subjetividade. A escolha de critérios de análise por cada observador, e a própria definição de um limiar de separação de maneira visual, principalmente na identificação de fluxos inseridos em um intervalo de transição, incorpora muitas incertezas nas classificações. Portanto, foram consideradas duas metodologias objetivas para separar as cicatrizes de fluxos de detritos em relação ao grau de confinamento. A primeira consiste em uma metodologia proposta por Marchesini et al. (2020) com base em unidades de encosta (Item 5.2.3.1) e a segunda é proposta a partir da caracterização morfométrica das cicatrizes (Item 5.2.3.2). Em ambas as classificações, os fluxos de detritos múltiplos foram segmentados, e cada trecho da cicatriz foi considerado como uma única cicatriz individual de fluxo de detritos.

#### **5.2.3.1. Classificação com base nas Unidades de Encosta (SU)**

Entre as poucas classificações objetivas, Marchesini et al. (2020) utilizaram uma metodologia com base na definição das unidades de encosta (SU) pelo método de Alvioli et al. (2016). Os fluxos de detritos que apresentam acima de 95% da área inserida em uma mesma unidade de encosta são classificados como fluxos de detritos de encosta aberta, uma vez que mantem a maior parte da geometria da cicatriz. Já os fluxos que apresentam mais de 5% da área entre diferentes unidades de encosta são classificados como fluxos de detritos canalizados, uma vez que são segmentados pelos limites entre cada unidade de encosta.

A definição das SU foi feita de maneira automatizada com o software *r.slopeunits*, proposto por Alvioli et al. (2016), que considera o MDT e alguns parâmetros de calibração. O software considera uma abordagem de iterações para partição da paisagem, partindo inicialmente da bacia subdividida pela rede de drenagem com o limiar de área de contribuição indicado (*thresh*). Cada sub-bacia passa por nova partição até que a área média das sub-bacias geradas esteja abaixo

do limiar estabelecido como área mínima (*areamin*), de forma que essa última partição é rejeitada, seguindo o número máximo de iterações estipulado. Cada sub-bacia aspirante a SU é então analisada individualmente quanto à área mínima e a variância circular (*cvmin*), sendo classificadas como SU aquelas que apresentarem valores inseridos nos limiares estabelecidos pelo operador. A cada iteração o limiar inicial de área de contribuição é dividido pelo fator de redução, e as partições seguem até que as novas sub-bacias estejam abaixo do limiar de área mínima ou acima do limiar de variância circular.

A delimitação das SU foi feita apenas na área de incidência das cicatrizes, correspondente a uma região de aproximadamente 100 km<sup>2</sup>, considerando os parâmetros apresentados na Tabela 14. O parâmetro de variância circular é representado por um coeficiente de 0 a 1, onde menores valores resultam em SU's mais homogêneas em termos de orientação da encosta, sendo estipulado com base no valor usado por Alvioli et al. (2016), indicando uma boa homogeneidade da área. A área mínima foi estimada pela área média de todas as cicatrizes, e o limiar de área de contribuição, considerado o parâmetro de maior sensibilidade quanto à densidade de SU, foi definido com base nos limiares de contribuição das sub-bacias de montante, nas nascentes do rio Mascarada. Na etapa final de processamento, são excluídas áreas planas e sub-bacias de área ou formato irrealis ou inaceitáveis, como SU muito alongadas com larguras de até dois pixels, as quais são acopladas às SU de maior proximidade.

Tabela 14. Parâmetros considerados para geração das SU.

Parâmetro	Valor	Descrição
<i>tresh</i>	20 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	Limiar de área de contribuição
<i>rf</i>	10	Fator de redução do <i>tresh</i> em cada iteração
<i>areamin</i>	2045 m <sup>2</sup>	Área mínima considerada em cada iteração
<i>cvmin</i>	0.35	Variância circular em função da orientação da encosta $(1 -  R /N)$ , onde N é o número de células da unidade e $ R $ é a magnitude do vetor resultante da orientação de cada célula

### 5.2.3.2. Classificação proposta com base na Morfometria da Cicatriz

As principais condicionantes da propagação de um fluxo de detritos estão associadas à reologia do movimento e a morfologia da encosta. A reologia do fluxo é bastante complexa, decorrente principalmente das variações de proporção e composição de materiais ao longo do percurso. Já a morfologia da encosta pode refletir visivelmente nos padrões de propagação do movimento, e atuar de maneira determinante para condicionar a dispersão do fluxo. Em decorrência dessa condição morfológica que estabelece um grau de confinamento no qual o fluxo ocorre, ele passa a ser caracterizado como um fluxo de detritos canalizado ou de encosta aberta. Os fluxos de detritos que seguem ambos os comportamentos, durante trechos equivalentes, são classificados como fluxos de detritos de transição.

A classificação proposta para diferenciar as duas classes de tipos de fluxos de detritos, quanto ao grau de confinamento, é feita com base no comportamento de propagação e na mobilidade do movimento, sendo considerados como representativos desse comportamento o comprimento e a largura do fluxo de detritos. A ideia conceitual da relação expressa entre o comprimento e a largura do fluxo em cada classificação é apresentada na Figura 28, onde cada curva representa uma condição específica de um fluxo de detritos.

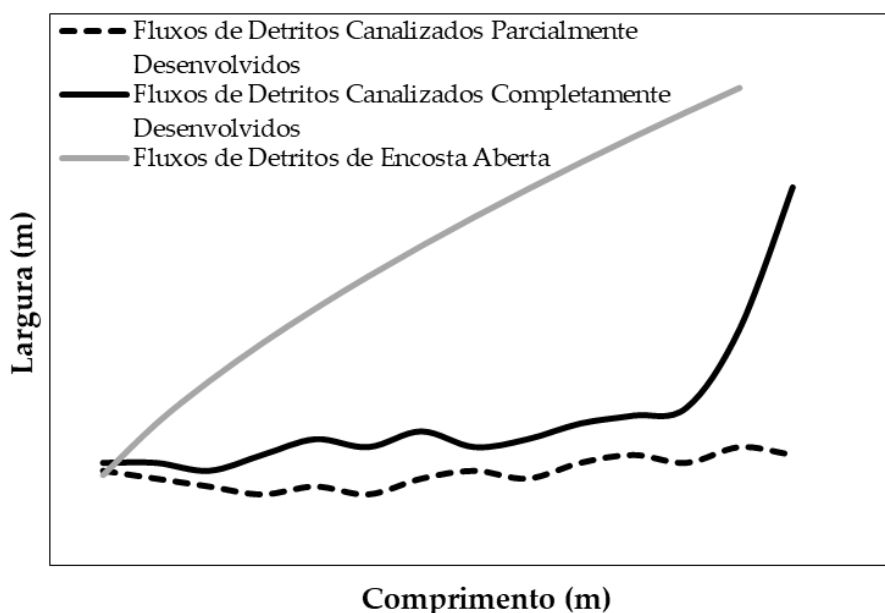


Figura 28. Modelo conceitual do comportamento dos tipos de fluxo de detritos, onde cada curva representa um tipo de propagação de fluxo de detritos.

O fluxo de detritos de encosta aberta, por ocorrer em encostas que apresentam pouco ou nenhum confinamento da vertente, apresenta maior facilidade de dispersão, e, portanto uma ampliação da largura do fluxo. Desconsiderando a existência de obstáculos e contenções no terreno, a propagação do fluxo gradualmente amplia a sua largura até o movimento cessar, configurando fluxos de detritos completamente desenvolvidos. Os fluxos de detritos parcialmente desenvolvidos não diferem o comportamento de propagação, sendo apenas interrompidos com antecedência, de forma que representam uma linha sobreposta ao modelo conceitual de fluxos de detritos de encosta aberta.

Por sua vez, o fluxo canalizado, por ocorrer inserido em um canal de drenagem, ou em uma vertente bastante encaixada, acaba não apresentando uma grande dispersão lateral do movimento, mas apresenta maior mobilidade e alcance do fluxo. Até uma determinada quantidade de material mobilizado, o fluxo permanece confinado, apresentando pequenas oscilações de largura, enquanto que o comprimento percorre longas distâncias.

Uma largura praticamente constante ao longo do comprimento do fluxo caracteriza fluxos canalizados parcialmente desenvolvidos, os quais não apresentam uma zona de deposição bem estabelecida, mas passam a propagar na forma de outros movimentos como fluxos hiperconcentrado ou inundação de detritos. A zona de deposição frequentemente associada aos fluxos de detritos canalizados, agora completamente desenvolvidos, é na forma de leques aluviais, que resultam em um aumento abrupto da largura, até então não observado. Assim, o grau de desenvolvimento dos fluxos de detritos canalizados, que passam de parcialmente a completamente desenvolvidos, é observado apenas em fluxos onde fica evidenciada essa expansão, delimitando a zona de deposição do movimento.

### **5.3. Análises Estatísticas**

As análises estatísticas foram geradas para todo o banco de dados da bacia do rio Mascarada, a fim de caracterizar globalmente os fluxos de detritos ocorridos na região. Além disso, após as classificações, foram apresentadas análises estatísticas dos parâmetros de cada grupo. Os parâmetros obtidos para as cicatrizes foram incorporados ao software Statistica 13.5 em conjunto com o programa RStudio (R Core Team, 2018), onde foram feitas análises de estatística básica com cada

variável individualmente e análises globalmente de todos os dados, buscando relações entre mais de uma variável. As cicatrizes foram consideradas individualmente nas análises, conforme separação dos trechos usada na hierarquia baseada em Horton (1945).

### 5.3.1. Análise Univariada

A análise univariada é utilizada para descrição dos dados examinando uma única variável por vez. Foram estimadas medidas de tendência central e medidas de dispersão, apresentando histogramas e *boxplots* de cada parâmetro. O intuito dessa análise é a identificação de um comportamento abrangente de todas as amostras, identificando o intervalo mais representativo dos valores de cada parâmetro descritivo dos fluxos de detritos da bacia do rio Mascarada. Portanto, para a análise univariada foram desconsiderados valores extremos e *outliers*, que na visão estatística representam valores atípicos e muito discrepantes do restante das amostras. A apresentação dos *boxplots* para análise geral dos fluxos foi feita de acordo com a classificação hierárquica da cicatriz. O resumo e a finalidade das análises estão representados no fluxograma da Figura 29.

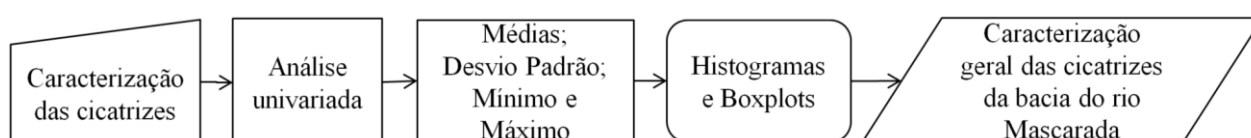


Figura 29. Fluxograma das análises univariadas.

Os *outliers* foram definidos como os valores acima e abaixo dos limiares do terceiro e primeiro quartil, respectivamente, conforme as equações (53) e (54).

$$outlier > UBV + 1.5(UBV - LBV) \quad (53)$$

$$outlier > LBV - 1.5(UBV - LBV) \quad (54)$$

Onde UBV representa o limite superior do *boxplot*, indicando o terceiro quartil e LBV representa o limite inferior do *boxplot*, indicando o primeiro quartil.

### 5.3.2. Análise Multivariada

As análises que consideram duas ou mais variáveis são descritas pela estatística bivariada e multivariada, que incluem as análises de correlação e agrupamentos, com o propósito de classificar as variáveis em grupos de maior semelhança e homogeneidade. Para análises de correlação, através do método de Pearson, foram utilizados os dados normalizados pelo método de mínimo e máximo, de forma a redimensionar o intervalo dos dados entre [0,1], com aplicação da fórmula na Equação (55).

$$z = \frac{x - \text{Min}(x)}{\text{Máx}(x) - \text{Min}(x)} \quad (55)$$

Em função da grande quantidade de parâmetros, buscando uma representação das cicatrizes de forma mais simplificada, também foi feita análise de componentes principais (ACP) a fim de identificar possíveis variáveis capazes de sintetizar a maior parte da variabilidade dos dados. Foram consideradas 16 variáveis contínuas, obtidas a partir da caracterização dos fluxos, e aplicada a ACP para identificar novas variáveis explicativas com a criação de componentes principais. O número de componentes principais da análise é igual ao número de variáveis consideradas, sendo que cada componente é resultante da associação dessas variáveis não correlacionadas. Geralmente são considerados os dois primeiros componentes, por representarem a maior variação total da amostra. Dentro das duas componentes, as variáveis de maior peso são ainda as que melhor descrevem a variabilidade dos dados.

As análises de agrupamento foram utilizadas para a classificação dos tipos de fluxo, buscando identificar alguma semelhança entre as cicatrizes que permitisse agrupar a partir do comportamento de propagação. Para cada cicatriz foi ajustada uma curva de regressão não linear do tipo potencial (56), e considerado o valor do expoente  $b$  e do coeficiente de correlação  $R^2$ . Com esses dois parâmetros foi feita uma análise de cluster não supervisionado, pelo método de agrupamento hierárquico através da distância euclidiana. Esse método permite mais de um tipo de partição dos dados, gerando diferentes agrupamentos em cada passo, acoplados em função da maior similaridade entre os parâmetros de cada cicatriz. O método



permite extrair até uma quantidade de agrupamentos igual ao número de dados de entrada, quanto menor o número de agrupamentos, maior a distância entre os grupos e, portanto, menor semelhança entre os parâmetros.

$$y = ax^b \quad (56)$$

A exibição dos agrupamentos é feita a partir de uma visualização gráfica por dendrogramas, onde o eixo das abcissas representa o número inicial de clusters representado pelo número total da amostra, e o eixo das ordenadas representa a distância euclidiana entre os agrupamentos. O interesse da análise é a geração de dois agrupamentos principais, que representam as cicatrizes de fluxos de detritos canalizados e as cicatrizes de fluxos de detritos de encosta aberta, e um terceiro agrupamento que seria vinculado aos fluxos de detritos de transição onde não há a definição de um único tipo de comportamento de propagação. As análises multivariadas estão resumidas a partir da Figura 30.

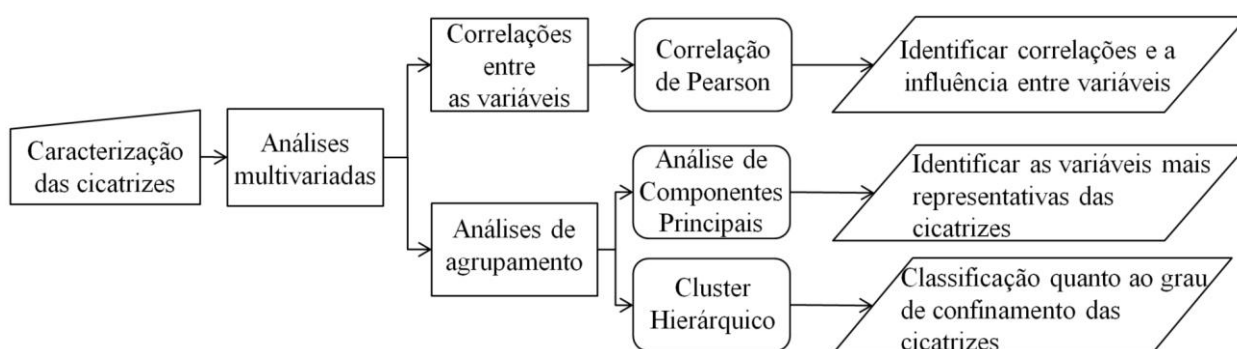


Figura 30. Fluxograma com resumo das análises multivariadas.

#### 5.4. Modelo de Suscetibilidade a Fluxos de Detritos

O modelo proposto para análise de suscetibilidade a fluxos de detritos consiste na aplicação das ferramentas da plataforma TauDEM, versão 5.3, manipuladas como extensão de softwares de geoprocessamento. A plataforma dispõe de uma série de ferramentas geradas com o intuito de extrair e analisar informações hidrológicas a partir da topografia. O modelo requer um MDT da área, previamente processado, e três parâmetros do fluxo, estimados empiricamente. A remoção das depressões do MDT é feita pelo preenchimento das células em

depressão, identificadas como áreas de baixa elevação inteiramente rodeadas por células de maior elevação, até a altura do ponto mais baixo do seu entorno. A aplicação do modelo consiste em até duas etapas representadas pela utilização das ferramentas *Avalanche Runout* (AR) e *Distance Down* (DD), abrangendo o uso para fluxos de detritos de encosta aberta e fluxos de detritos canalizados.

A aplicação das ferramentas parte das áreas de origem do fluxo de detritos, previamente identificadas através de modelos de suscetibilidade a escorregamentos translacionais. A partir da origem o fluxo passa a ser simulado pela ferramenta *Avalanche Runout* delimitando a propagação do fluxo pela encosta. No entanto, quando o fluxo é incorporado em um canal de drenagem de maior ordem, as linhas do escoamento convergem em uma única direção, confinando o fluxo e restringindo a sua dispersão. Prochaska et al. (2008) apontam essa condição como uma limitação do método de direcionamento de fluxo do algoritmo D-infinito, onde sobre determinadas condições, como na planície aluvial, resulta em um espalhamento insuficiente. Por conseguinte, para fluxos de detritos canalizados completamente desenvolvidos, ou em trechos de propagação em que houver confinamento do fluxo, onde a ferramenta *Avalanche Runout* já não é capaz de representar a dispersão lateral do movimento, a área afetada passa a ser obtida pela ferramenta *Distance Down*. Ambas as ferramentas consideram o método de infinitas direções de fluxo para a propagação da área afetada (TARBOTON, 1997). A Figura 31 apresenta a dinâmica simplificada de aplicação do modelo, onde todos os dados de entrada, além do MDT e das áreas de origem, são empiricamente obtidos.

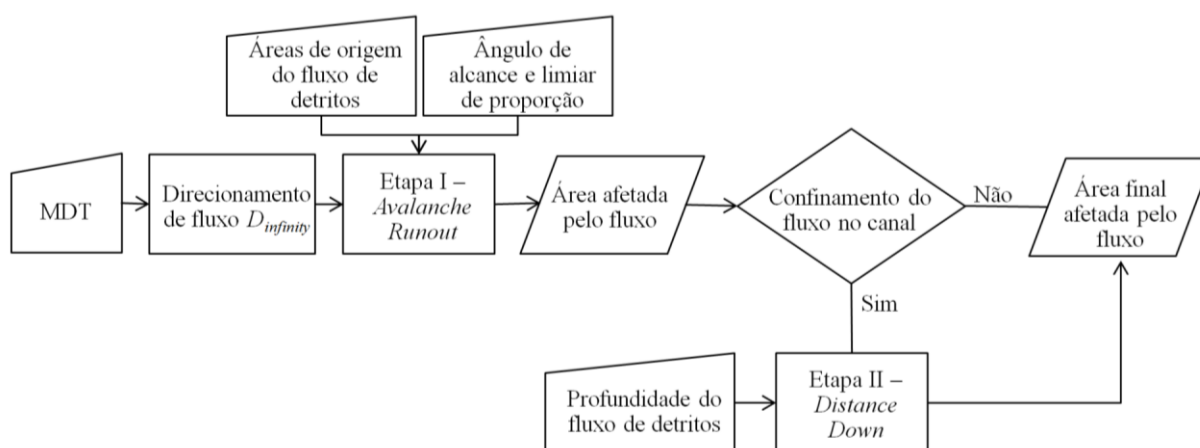


Figura 31. Fluxograma de aplicação do modelo de análise de suscetibilidade.

### 5.4.1. Avalanche Runout

A ferramenta *D-infinity Avalanche Runout* (AR) consiste na determinação da área afetada pelo fluxo de detritos, indicando a partir do ponto de origem o alcance máximo e a dispersão do escoamento. A aplicação da ferramenta requer quatro dados de entrada. Além do direcionamento de fluxo pelo D-infinito, é necessário delimitar a origem do movimento, definir um ângulo de alcance, usado como critério de parada, e estipular um limiar de proporção com a finalidade de restringir os efeitos de dispersão gerados pelo método de direção de fluxo. O limiar, variando de 0 a 1, representa a porcentagem mínima de fluxo que uma célula deve receber para ser considerada parte da área afetada, conforme indicado pelas equações (57) e (58). Um limiar de proporção zero representa uma ausência de restrição, resultando na máxima dispersão de fluxo. Por sua vez, um limiar igual a 1 indica que a célula deve receber 100% do fluxo para ser considerada parte da área afetada, restringindo completamente o espalhamento do fluxo. Para fluxos de encosta aberta a simulação da área afetada depende apenas dessa ferramenta. No entanto, em trechos de confinamento da propagação do fluxo durante a simulação, especialmente para fluxos de detritos canalizados, é necessário aplicar inicialmente a *Avalanche Runout*, e em seguida a *Distance Down*.

### 5.4.2. Direção de Fluxo D-infinito

O direcionamento de fluxo é determinado para cada célula do MDT com a geração de um caminho preferencial em função do maior desnível negativo. O método do D-infinito permite considerar infinitas direções de fluxo continuamente numa direção entre 0 e  $2\pi$ , de forma que o fluxo pode ser direcionado para até duas das oito células vizinhas. Conforme Figura 32, as células são divididas em uma configuração de oito facetas triangulares que ocupam uma parcela da área de dois pixels vizinhos. O vetor de direção de fluxo é estabelecido partindo do pixel central em direção ao maior desnível negativo, separando a faceta em dois ângulos adjacentes, nomeados de  $\omega_1$  e  $\omega_2$ . No caso de um desses ângulos ser  $0^\circ$ , a direção do fluxo será centralizada em apenas uma das células, se o ângulo for maior que  $0^\circ$ , o fluxo será dividido proporcionalmente entre as duas células vizinhas conforme as Equações (57) e (58).

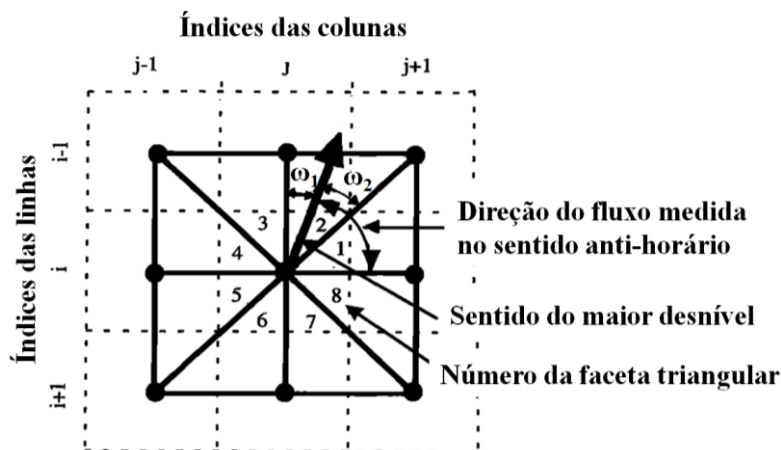


Figura 32. Configuração de grid utilizado no método do D-infinito.  
(Adaptado de Tarboton, 1997).

$$F_{(i-1,j)} = \frac{\omega_2}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad (57)$$

$$F_{(i-1,j+1)} = \frac{\omega_1}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad (58)$$

### 5.4.3. Distance Down

A ferramenta *D-infinity Distance Down* (DD), proposta por Tesfa et al. (2011), é necessariamente aplicada em conjunto com a *Avalanche Runout* para simular os trechos de fluxo de detritos confinados no canal de drenagem. A aplicação da ferramenta é feita considerando um limiar de acumulação de fluxo para drenagem a partir do trecho de confinamento da simulação, onde não há boa representação pela *Avalanche Runout*, justamente pela restrição de dispersão do fluxo no canal. Dessa forma, a condição de maior representatividade é obtida pela junção dos dois resultados, sendo a parte inicial gerada pela *Avalanche Runout*, e a região de convergência das linhas de fluxo no canal, pela *Distance Down*. Uma vez que a iniciação de fluxos de detritos canalizados é frequentemente associada aos *hollows*, em bacias de ordem zero, a aplicação da *Distance Down* isoladamente não garante a representação completa do movimento. Não obstante, o critério de parada do fluxo deve ser mantido pela *Avalanche Runout*, em função do ângulo de alcance característico para os fluxos de detritos canalizados na região.

A *Distance Down* permite medir a distância vertical, horizontal, real ou euclidiana entre cada célula do terreno e o canal de drenagem mais próximo, seguindo o

percurso da direção de fluxo obtido pelo D-infinito. Dessa forma, ainda é possível que a distância medida seja calculada a partir do caminho de fluxo mais próximo, mais longo ou pela média ponderada até o canal do escoamento. Para estimativa da área afetada pelo fluxo de detritos, foi utilizada a medida da distância vertical obtida em relação ao canal pela média ponderada do caminho da direção de fluxo.

O procedimento é feito a partir de um MDT com depressões preenchidas, do qual são obtidas as direções de fluxo de cada célula e a rede de drenagem. Logo, são estabelecidas as células de origem da rede de drenagem, considerando uma área mínima de contribuição a partir do trecho com baixa representação pela *Avalanche Runout*, em canais de maior ordem. Cada célula do MDT é comparada à célula do canal mais próxima pelo caminho escolhido da direção de fluxo, passando a valer a diferença de elevação entre elas. Consequentemente, as células da rede de drenagem passam a valer zero, uma vez que a célula foi subtraída por ela mesma. A diferença de elevação entre as células do MDT e do canal compõe o modelo gerado pela *Distance Down*. A partir desse modelo é definido um limiar de profundidade que corresponde à máxima diferença de altura acima do canal de drenagem, onde as células passam a fazer parte da área afetada na simulação. Todas as células que apresentam uma diferença de nível igual ou menor que o limiar estabelecido são definidas como parte da área afetada, a qual necessariamente ocorre em torno do canal de drenagem. O valor do limiar de proporção é estimado de maneira empírica em função da profundidade de material do fluxo de detritos, estabelecendo a máxima dispersão lateral do movimento. A Figura 33 ilustra parte do processamento de aplicação da *Distance Down*, onde as células em azul da parcela representativa do MDE indicam o canal de drenagem, e as diferenças de coloração do modelo gerado representam a direção de fluxo entre as células.

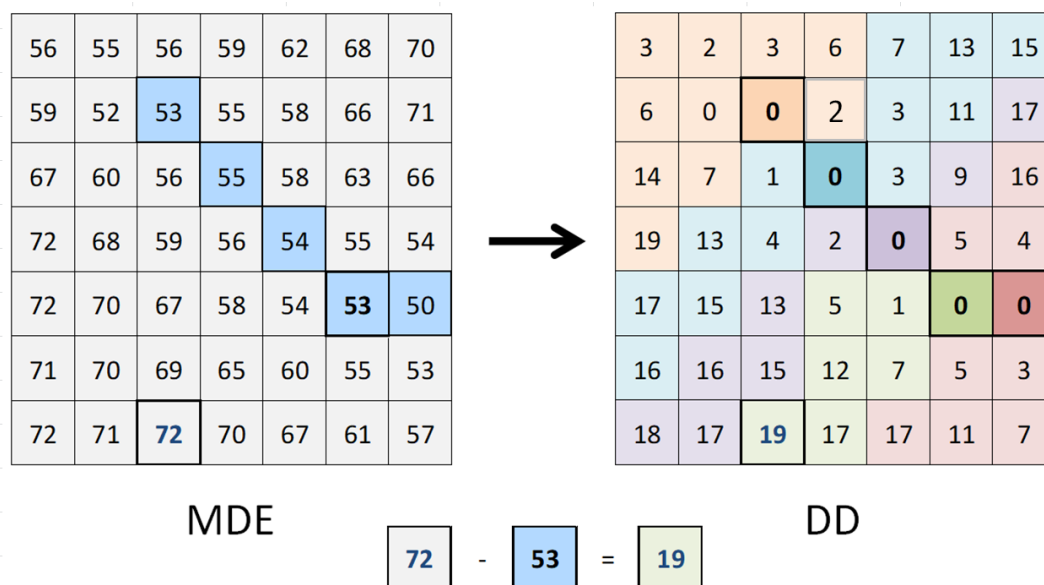


Figura 33. Ilustração do processamento pela *Distance Down*. (Adaptado de Rennó et al., 2008).

#### 5.4.4. Parâmetros de Calibração

Os três parâmetros de calibração necessários para a aplicação do modelo são o ângulo de alcance, o limiar de proporção e a altura de material do fluxo. A obtenção desses parâmetros de maneira empírica facilita a aplicação do modelo em escala regional, descrevendo de maneira padronizada o movimento. O ângulo de alcance e o limiar de proporção do espalhamento podem ser definidos com base em fluxos de detritos já ocorridos na região ou regiões de características semelhantes.

O ângulo de alcance, embora próprio de cada movimento, tende a ser representativo de fluxos ocorridos em uma mesma área. Os valores trazidos da literatura (Item 3.3.1.1) ressaltam a semelhança entre diversos eventos, com uma discrepância nos valores de Dai e Lee (2001). Em vista disso, utilizando o modelo para fins de análise regional, valores mais baixos do ângulo de alcance representam cenários mais conservativos, garantindo o alcance da simulação até os pontos de maior alcance dos fluxos de detritos já ocorridos. Portanto, a utilização dos valores mínimos de ângulo de alcance reconhecidos em uma região devem ser adotados para uma abordagem mais conservadora.

O limiar de proporção descreve uma restrição do método de direcionamento de fluxo, então por mais que represente uma variação nos resultados, essa variação é limitada pela condição de ausência de um limiar (limiar de proporção igual a zero),

que representa o máximo espalhamento possível do modelo, ou a ausência completa dele. O limiar de proporção varia de 0 a 1, sendo sugerido pela própria ferramenta o valor 0.2. A sensibilidade do modelo a esse limiar é apresentada por Salvador (2018) com variações de 0.025, onde é possível constatar que o valor do coeficiente é fortemente influenciado pelas condições de confinamento da encosta, enquanto que apresenta variações mais atenuadas para pequenas alterações no limiar.

Para a definição do limiar que representa a profundidade do fluxo de detritos é proposta uma equação empírica que considera como entrada o volume a montante do fluxo de detritos e a declividade do canal. Partindo da equação fundamental da vazão (Equação (59)), dada pela área da seção transversal ( $A_T$ ) e a velocidade ( $v$ ), substituímos respectivamente esses dois termos pelas equações ((60) e (28)). Entre os formatos de seção transversal mais recorrente de passagem de fluxos de detritos estão as seções triangular, retangular e trapezoidal (HAN et al., 2014), sendo inicialmente considerada uma seção triangular. A equação (28) representa uma equação genérica da velocidade sugerida por Lo (2000). Além disso, a vazão do fluxo de detritos ( $Q$ ) foi substituída pela vazão de pico ( $Q_p$ ), conforme trazido por Hungr et al. (1984), próximo a vazão de pico o fluxo apresenta um comportamento laminar. Por sua vez, a vazão de pico dada em função do volume do fluxo apresenta uma relação do formato da equação (61).

$$Q = A_T \cdot v \quad (59)$$

$$A_T = \frac{h \cdot w}{2} \quad (60)$$

$$Q_p = \varphi \cdot V^\beta \quad (61)$$

A junção de todas essas variáveis e equações, isolando a variável de profundidade do fluxo, resultou na Equação (62). Considerando o comportamento de propagação dos fluxos de detritos canalizados, conforme modelo conceitual trazido na Figura 28, o valor da largura do fluxo apresenta pouca variação durante o percurso, de forma que a largura passa a ser considerada uma constante da equação. Agrupando as constantes da equação (62), obtemos o parâmetro de calibração da equação ( $\phi$ ) (Equação (63)), resultando na equação genérica para cálculo da profundidade do fluxo em canais de seção triangular conforme a Equação

(64). Estimando os coeficientes e expoentes da equação a partir de dados empíricos das relações descritas anteriormente, passam a ser dados de entrada o volume a montante e a declividade do canal de propagação do fluxo.

$$h = \left( \frac{2 \cdot \varphi \cdot V^\beta}{a \cdot w \cdot S^c} \right)^{\frac{1}{b+1}} \quad (62)$$

$$\phi = \frac{2\varphi}{aw} \quad (63)$$

$$h = \left( \phi \frac{V^\beta}{S^c} \right)^{\frac{1}{b+1}} \quad (64)$$

### 5.5. Aplicação e Desempenho do Modelo

A aplicação do modelo proposto foi feita em algumas encostas da bacia do rio Mascarada, abrangendo diferentes condições de propagação e ocorrência dos fluxos de detritos. Foram feitas quatro aplicações do modelo considerando: i) uma encosta com fluxos de encosta aberta (Figura 34a), ii) um fluxo canalizado múltiplo (Figura 34b), iii) uma área com fluxos canalizados individuais (Figura 34c,d), e iv) todas as cicatrizes da bacia. A aplicação dos itens i e ii foram feitas a partir da calibração empírica com dados da caracterização dos fluxos da bacia do rio Mascarada, a fim de verificar individualmente o desempenho do modelo considerando dados de maneira regional. Esses mesmos parâmetros foram considerados no cenário de toda a bacia (item iv). Já para o item iii, os parâmetros foram calibrados com a própria cicatriz de cada fluxo.



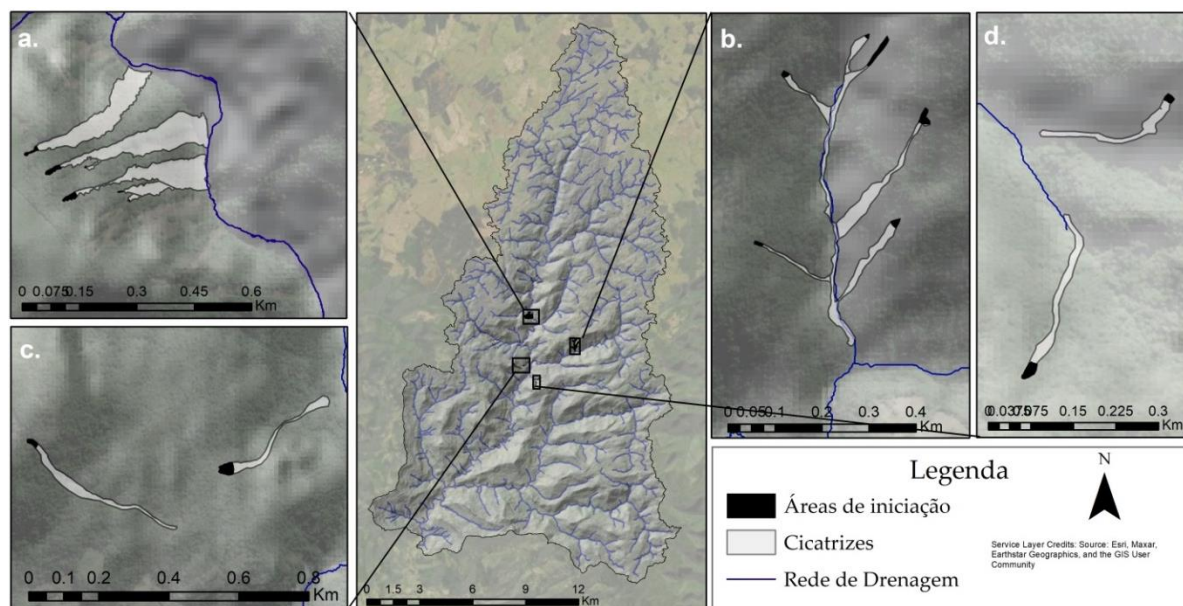


Figura 34. Fluxos simulados. (a) Fluxos de detritos de encosta aberta. (b) Fluxo de detritos múltiplo canalizado. (c) e (d) Fluxos de detritos canalizados, calibrados e comparados com modelo fisicamente embasado.

Para a aplicação do modelo foi utilizado o MDT de 1 metro de resolução e as áreas de origem foram consideradas como a área correspondente a 10% do comprimento total da cicatriz. A delimitação dessa área de origem foi feita a partir do ponto mais a montante da cicatriz, até um alcance correspondente a uma distância de 10% do comprimento total dessa mesma cicatriz.

Para os fluxos descritos no item iii, os parâmetros do modelo foram calibrados individualmente para cada fluxo, a fim de obter o melhor cenário de simulação. A calibração do ângulo de alcance foi feita considerando o valor obtido em cada fluxo durante a caracterização das cicatrizes. Para o limiar de proporção foi observada visualmente a variação dos resultados com pequenas alterações no coeficiente. O limiar de proporção foi calculado entre 0 e 1, com espaçamento de 0.1 para identificar o intervalo dos coeficientes com melhor desempenho. Entre os dois novos coeficientes foi testado com um espaçamento reduzido de 0.01 até identificar o coeficiente de melhor desempenho. Em encostas mais encaixadas pequenas variações do limiar de proporção não resultam em alterações significativas dos resultados. Os fluxos canalizados individuais não chegaram a propagar em uma vertente extremamente confinada, de modo que a utilização da segunda etapa do modelo não foi necessária.

O resultado obtido para os fluxos canalizados individuais foi ainda comparado com uma simulação feita utilizando o modelo fisicamente embasado de Paul (2020), considerando a propagação dos fluxos com uma reologia de fluido dilatante, viscosidade cinemática de  $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ , e um modelo de direcionamento de fluxo múltiplo (*Multiple Flow Direction* – FREEMAN, 1991).

Para as aplicações de caráter regional (i, ii e iv) a definição do ângulo de alcance é dada pelo valor mínimo encontrado para cada tipo de grau de confinamento dos fluxos de detritos conforme caracterização das cicatrizes, de forma a não restringir o alcance máximo do fluxo e simular o cenário mais crítico. Para o cenário de aplicação em toda a bacia foi usado o menor ângulo entre os dois valores. Para o limiar de proporção foi utilizado o valor de 0.37 com base em Salvador (2018), identificado como o limiar que resultou numa condição intermediária de dispersão e espalhamento do fluxo.

Para o fluxo canalizado múltiplo - aplicação item ii - foram necessárias as duas etapas do modelo, sendo preciso estimar o valor de profundidade do fluxo. O valor calibrado nesse cenário foi considerado como parâmetro de entrada para o item iv, em toda a bacia. Na simulação de toda a bacia do rio Mascarada foi aplicada a segunda etapa do modelo apenas sobre o rio principal, com um valor de profundidade do fluxo conforme calibrado no item ii.

A propagação com a *Distance Down* foi feita a partir do fluxo de detritos principal, de maior ordem, coincidente com um canal de drenagem de limiar de acumulação de  $10^6 \text{ m}^2$ , propagada até atingir o ângulo de alcance estabelecido. O valor de profundidade nesse trecho do fluxo de detritos foi obtido a partir da equação (64), considerando no lugar dos coeficientes os valores trazidos por equações da literatura obtidas para fluxos de detritos (Tabela 15). Foram consideradas duas equações que estimam: a vazão de pico em função do volume, e a velocidade do fluxo em função da profundidade e da declividade. A equação da vazão de pico foi proposta por Mizuyama et al. (1992) para fluxos de detritos com lama, estabelecida com a maior quantidade de observações entre as equações da literatura. Os expoentes considerados pela equação da velocidade são os que apresentam as maiores taxas de correlação, conforme trazido por Prochaska et al. (2008).

Tabela 15. Valores considerados para equação de profundidade do fluxo.

Coeficiente	Valor	Equação de Origem
$\varphi$	0.019	(42)
$\beta$	0.79	(42)
$a$	0.35	(29)
$b$	2	(29)
$c$	1	(29)

O volume do fluxo de detritos necessário para o cálculo da profundidade foi estimado a partir da média entre as equações da Tabela 5, que relacionam o volume com a área afetada. Foi considerado o volume total de todas as cicatrizes de menor ordem para estimar a propagação na cicatriz principal, de maior ordem. A declividade usada foi do trecho do canal de drenagem sobre o fluxo principal, considerando o início do limiar de acumulação até o final da zona de delimitação da cicatriz.

O desempenho do modelo foi avaliado pelos índices de erro (IE) e índice de acerto (IA) (Equações (65) e (66)), e a relação entre eles, conforme proposto por Sorbino et al. (2010). Quanto maior a taxa IA/IE, melhor o desempenho do modelo. O valor dos falsos positivos é indicado por toda área simulada pelo modelo, subtraída a área incidente sobre a cicatriz. E a área máxima possível de ser atingida é considerada em cinco vezes a área total da cicatriz, conforme proposto por Mergili et al. (2015). O valor de verdadeiros positivos é calculado como as áreas simuladas pelo modelo incidentes sobre a área observada da cicatriz.

$$IE = \frac{\textit{Falsos Positivos}}{\textit{Área máxima possível de ser atingida}} \quad (65)$$

$$IA = \frac{\textit{Verdadeiros Positivos}}{\textit{Área observada da cicatriz}} \quad (66)$$

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Caracterização das Cicatrizes

Foram mapeadas ao todo 370 cicatrizes de fluxos de detritos na bacia do rio Mascarada das quais 272 são fluxos individuais, que não apresentam diferentes áreas de iniciação, junções ou separações ao longo do percurso, e 98 são cicatrizes de fluxos múltiplos (Figura 35). A separação das cicatrizes dos fluxos múltiplos foi feita conforme Figura 35b, onde em uma mesma cicatriz são observados oito trechos diferentes que se conectam em algum ponto, sendo o maior deles, correspondente a cicatriz de terceira ordem, conforme classificação proposta com base na hierarquia dos fluxos de detritos (Item 6.1.1).

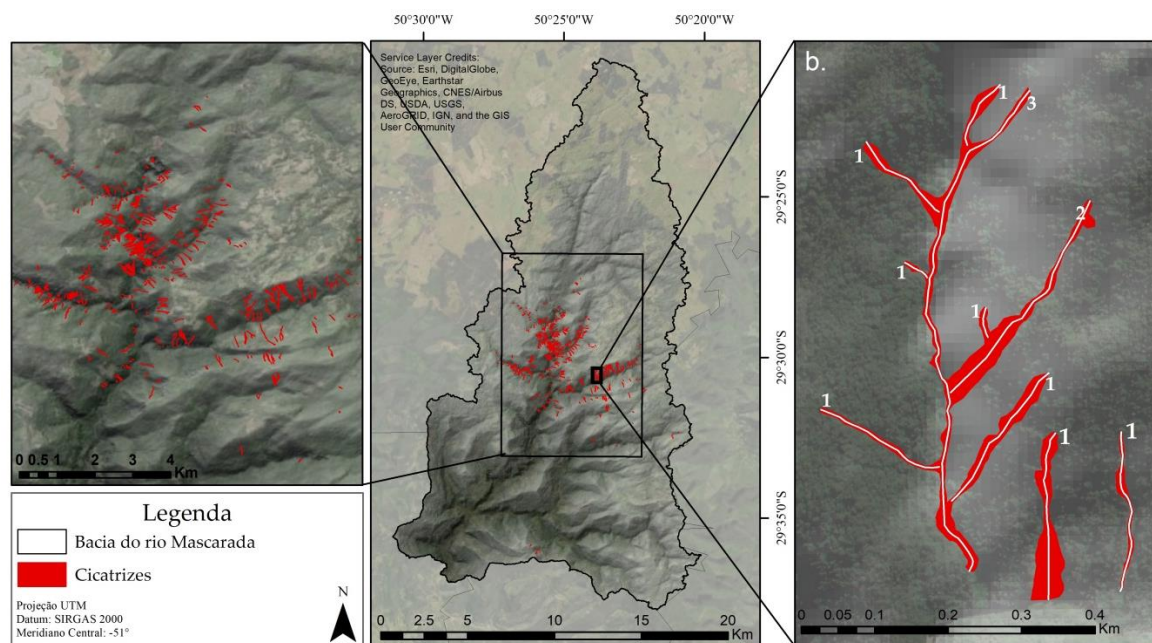


Figura 35. Cicatrizes mapeadas na bacia do rio Mascarada.

A delimitação das cicatrizes considerou principalmente a zona de iniciação e a zona de transporte dos fluxos. A identificação visual das áreas de deposição não foi possível em todas as cicatrizes, essencialmente para os fluxos de detritos canalizados, o que sugere a ocorrência de fluxos parcialmente desenvolvidos. Em virtude da elevada vazão nos canais de drenagem, além da junção dos volumes com fluxos mais a montante, alguns fluxos foram propagados como inundações de detritos, e seguiram agregados pelo canal, sendo os principais responsáveis pelo

desastre na cidade de Rolante. Relatos do Corpo de Bombeiros do município apontaram grande quantidade de lama na caracterização do fluxo.

A hipótese de formação de uma barragem natural também acaba alterando consideravelmente as condições de propagação do movimento, e retrata a complexidade na delimitação dos depósitos de material, impossibilitando a separação apenas por imagem de satélite e até mesmo em campo das áreas de deposição respectivas a cada origem. Portanto, os extremos da delimitação a jusante da cicatriz estão vinculados a um maior grau de incerteza. Da mesma forma, as bordas de delimitação da cicatriz, majoritariamente sobre áreas com vegetação, também assumem algumas incertezas em virtude da resolução da imagem e interferência das copas das árvores. Essa limitação reflete principalmente na área, largura e perímetro da cicatriz, razão pela qual algumas larguras foram comparadas com medições em campo (Figura 36).

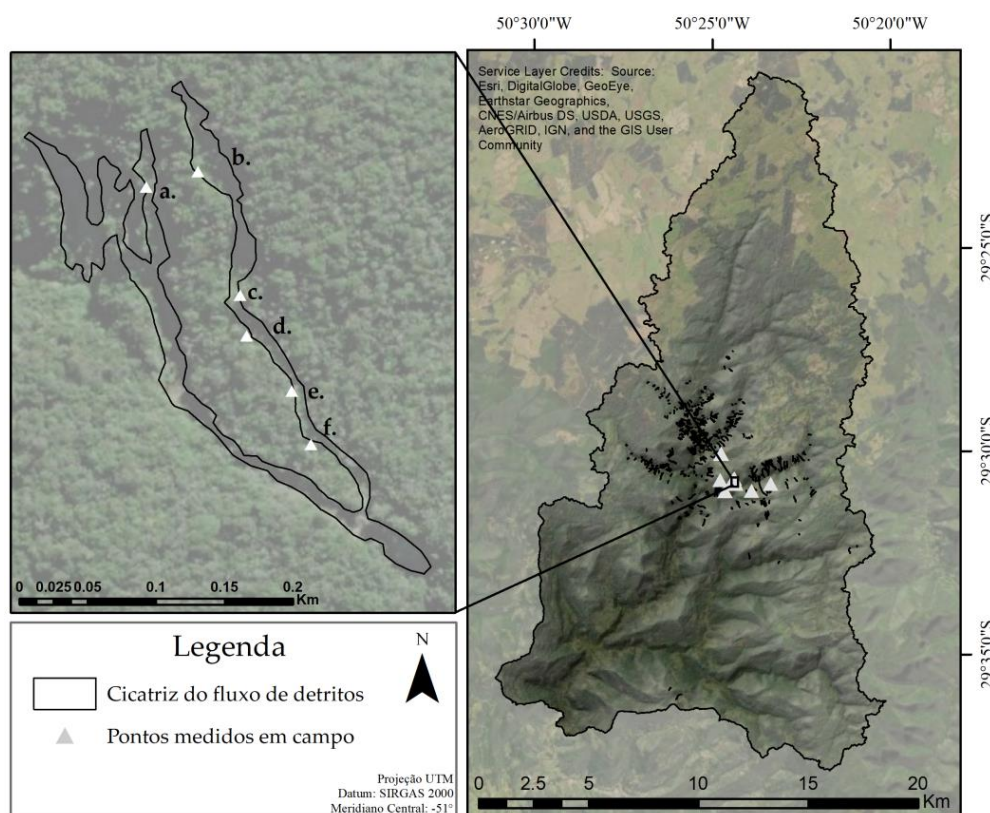


Figura 36. Pontos de medição em campo da largura da cicatriz.

A Tabela 16 apresenta essas comparações com o erro associado de cada medida. Conforme as medições em campo, a tendência das delimitações por imagem é de reduzir a área da cicatriz. Em média a delimitação subestima a largura real em 10%. Apenas dois pontos de medição apresentaram diferença positiva entre

a largura da cicatriz mapeada e a largura real, superestimando em até 40% o valor medido. No entanto, apesar dessa discrepância pontual, podendo estar associada a questões de sombreamento da imagem, algumas medições apresentaram cerca de 1% de erro associado à delimitação da cicatriz.

Tabela 16. Larguras medidas em campo e na imagem por geoprocessamento.

Descrição do ponto conforme Figura 36	Largura medida em campo	Largura da Cicatriz mapeada	Erro da medição
a.	24.5	27.5	3
b.	21.7	20.9	-0.85
c.	14.6	9.9	-4.7
d.	12.7	11.2	-1.55
e.	8.8	7.0	-1.8
f.	10.2	9.8	-0.4
-	10.1	9.3	-0.8
-	30	42.2	12.2
-	11	10.9	-0.1
-	10.8	8.5	-2.3
-	15.5	15.3	-0.2
-	10.8	10.2	-0.6
-	7.4	7.0	-0.4
RMSE			0.42

Em uma bacia de 320 km<sup>2</sup> as cicatrizes totalizam uma área afetada de 1 km<sup>2</sup>, onde 96% da área total das cicatrizes incide sobre áreas florestadas, com mata nativa ou florestas plantadas. Portanto, todas as cicatrizes foram caracterizadas como fluxos de detritos lenhosos, sem estabelecer diferenciação quanto ao tipo de material do fluxo.

### 6.1.1. Índices morfométricos com base na Hierarquia das Cicatrizes

Individualizando cada trecho das cicatrizes e classificando conforme a hierarquização proposta são identificadas 486 cicatrizes de fluxos de detritos, das quais 409 são de primeira ordem, 69 de segunda ordem e 8 de terceira ordem

(Tabela 17). Como nos canais de drenagem, o número de cicatrizes em cada ordem segue uma série inversa, sendo o número de cicatrizes de primeira ordem muito acima das ordens subsequentes, justamente por englobar fluxos de detritos individuais, que representam a grande maioria. O comprimento médio dos fluxos, bem como a largura e área seguem tendência crescente com o aumento da ordem das cicatrizes. Por sua vez, a declividade média reduz com o aumento da ordem da cicatriz. Da mesma forma que canais de primeira ordem tendem a ocorrer em relevos mais inclinados e próximos as nascentes, as cicatrizes de primeira ordem tendem a ocorrer em áreas mais declivosas, próximas as cabeceiras, quanto maior a ordem da cicatriz maior o alcance e, portanto, o fluxo passa a propagar por áreas de menor declividade.

Tabela 17. Caracterização geral das cicatrizes de cada ordem.

Ordem	N	Comprimento médio (m)	Área média (m <sup>2</sup> )	Largura média (m)	Declividade Média (°)
1 <sup>a</sup>	409	114.48	1645.31	13.08	38.09
2 <sup>a</sup>	69	218.97	3838.85	16.33	37.19
3 <sup>a</sup>	8	460.16	7223.95	17.74	32.35

Os índices que expressam a relação entre as ordens das cicatrizes (Tabela 18) diferem substancialmente dos índices gerados para canais de drenagem, no entanto existe uma relação de comportamentos. Quanto aos índices de bifurcação, conforme relações propostas por Horton (1945) são sugeridos valores próximo a 2 para regiões mais planas, enquanto que índices maiores que 3 ou 4 indicam áreas inclinadas e bastante dissecadas. As relações de bifurcação das cicatrizes resultam em valores bem altos, e concordam com as conclusões obtidas para os canais de drenagem, uma vez que fluxos de detritos naturalmente ocorrem em regiões de maior declividade.

As relações de comprimento das cicatrizes, também seguem a tendência de comportamento trazida pela 2<sup>a</sup> Lei de Horton (1924), de forma que fluxos de detritos de menor ordem sugerem um menor desenvolvimento hidrossedimentológico e, portanto, menor alcance. Quanto aos índices associados ao gradiente de declividades, embora a diferença tenha sido pouco significativa entre as ordens dos fluxos de detritos, existe uma tendência de redução da declividade com o aumento

da ordem da cicatriz. No entanto, todas as declividades médias indicam valores elevados, analogamente aos canais, inferindo em elevado potencial de atividade erosiva, especialmente em fluxos de detritos de menor ordem.

Tabela 18. Índices morfométricos das cicatrizes.

Índice	Valor
$R_b 1^a/2^a$	5.91
$R_b 2^a/3^a$	8.63
$RL_m 3^a/2^a$	2.10
$RL_m 2^a/ 1^a$	1.91
$R_g 3^a/2^a$	1.02
$R_g 2^a/1^a$	1.15
$D_c (km^2)$	38

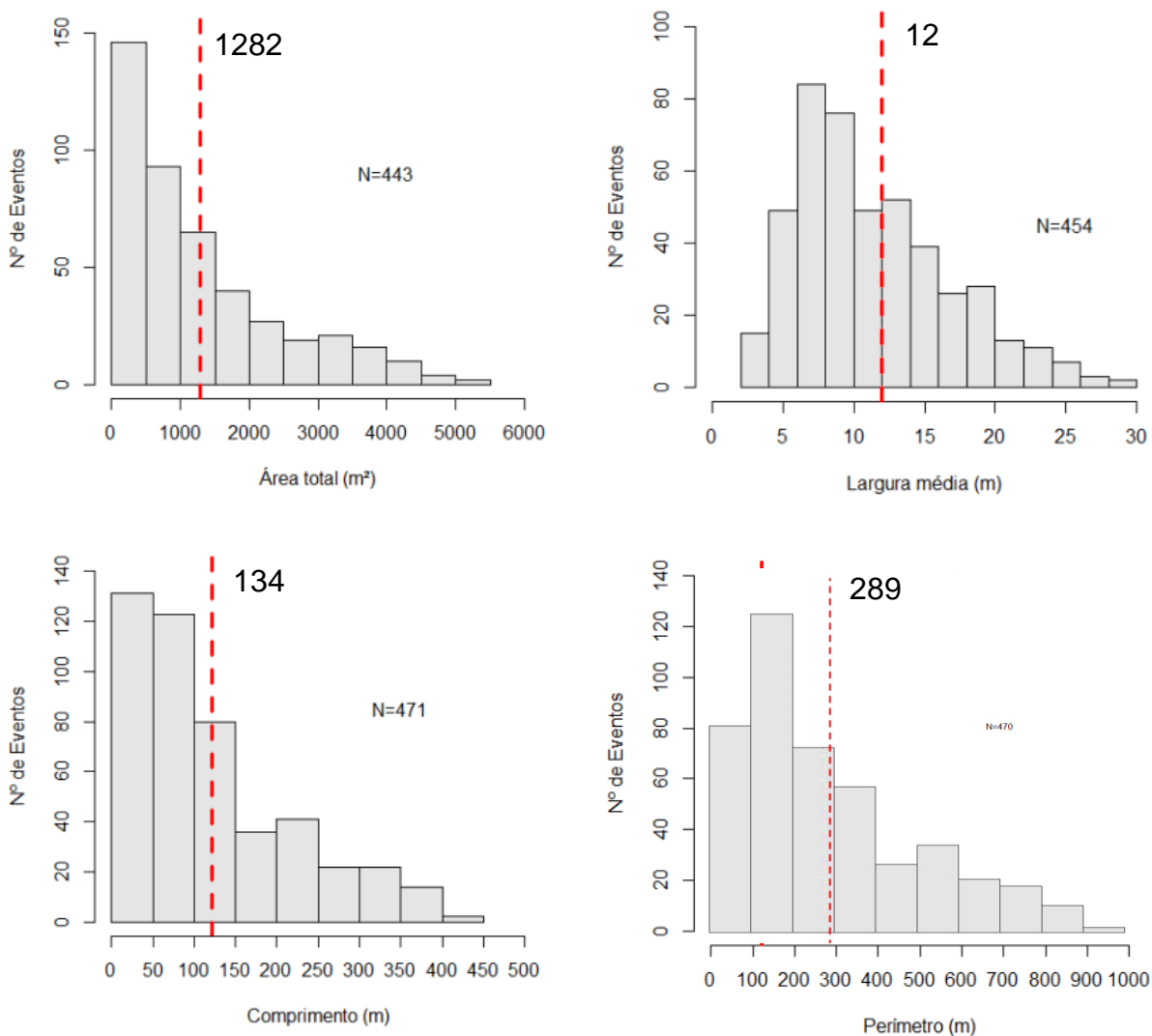
O índice que representa a densidade de cicatriz de uma bacia hidrográfica é considerado o com maior divergência na comparação comportamental com a relação de drenagem da bacia. A incidência dos fluxos de detritos depende não somente da relação de incremento de água e declividade, mas também da disponibilidade de material a ser mobilizado. Além disso, os limiares que tangem o processo de desencadeamento de um fluxo de detritos diferem consideravelmente dos canais de drenagem, e grande parte da bacia acaba não influenciando na sua ocorrência e propagação. Em vista disso, utilizando o número de cicatrizes em função da área de influência definida por Zanandrea et al. (2018), é obtido um valor bastante elevado no índice de densidade de cicatriz, refletindo a elevada concentração de fluxos desencadeados na região.

A área de influência das cicatrizes foi de 12.5 km<sup>2</sup>, cerca de 10 vezes menor que a área de influência trazida por Cardozo et al. (2021), para o mesmo evento. Essa diferença reflete a elevada sensibilidade de estudos de caracterização quanto a metodologia e critérios utilizados na criação do inventário de cicatrizes. Ao compararmos as delimitações das cicatrizes de ambos os inventários, observamos que as cicatrizes de Cardozo et al. (2021) estão com dimensões superestimadas. Observando o somatório dos comprimentos das cicatrizes e da área total afetada, resultam em mais que o dobro dos valores obtidos neste trabalho, o que justifica as diferenças no valor do índice de densidade de cicatriz.



### 6.1.2. Análises Morfométricas

A caracterização geral quanto às cicatrizes dos fluxos de detritos está apresentada na Figura 37 a partir de histogramas de cada parâmetro, sendo desconsiderados os valores classificados como *outliers*, justificando as diferentes quantidades amostrais (N) em cada histograma. A Figura 38 apresenta os diagramas de caixa, conhecidos como *boxplots*, onde é possível visualizar a dispersão dos valores em cada parâmetro, conforme hierarquia baseada em Horton (1945) das cicatrizes.



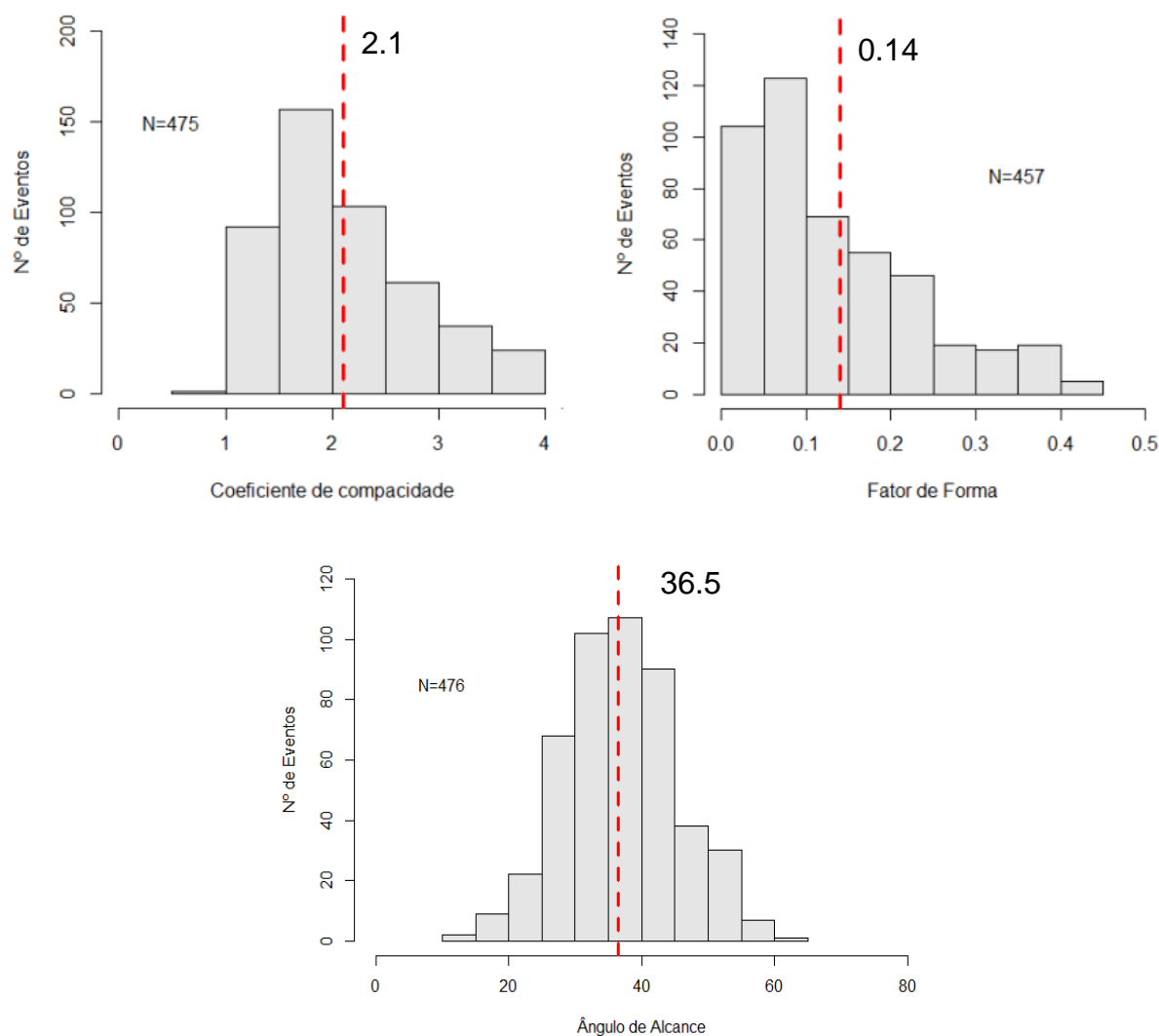
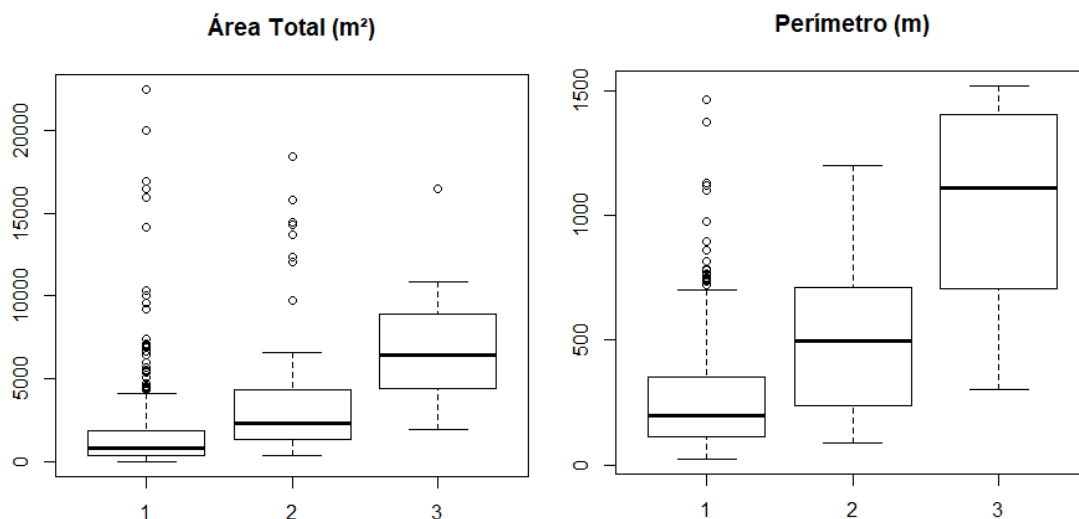


Figura 37. Histogramas de caracterização das Cicatrizes, com sinalização do valor médio de cada parâmetro pela linha vermelha tracejada e onde N representa o nº de cicatrizes da amostra.



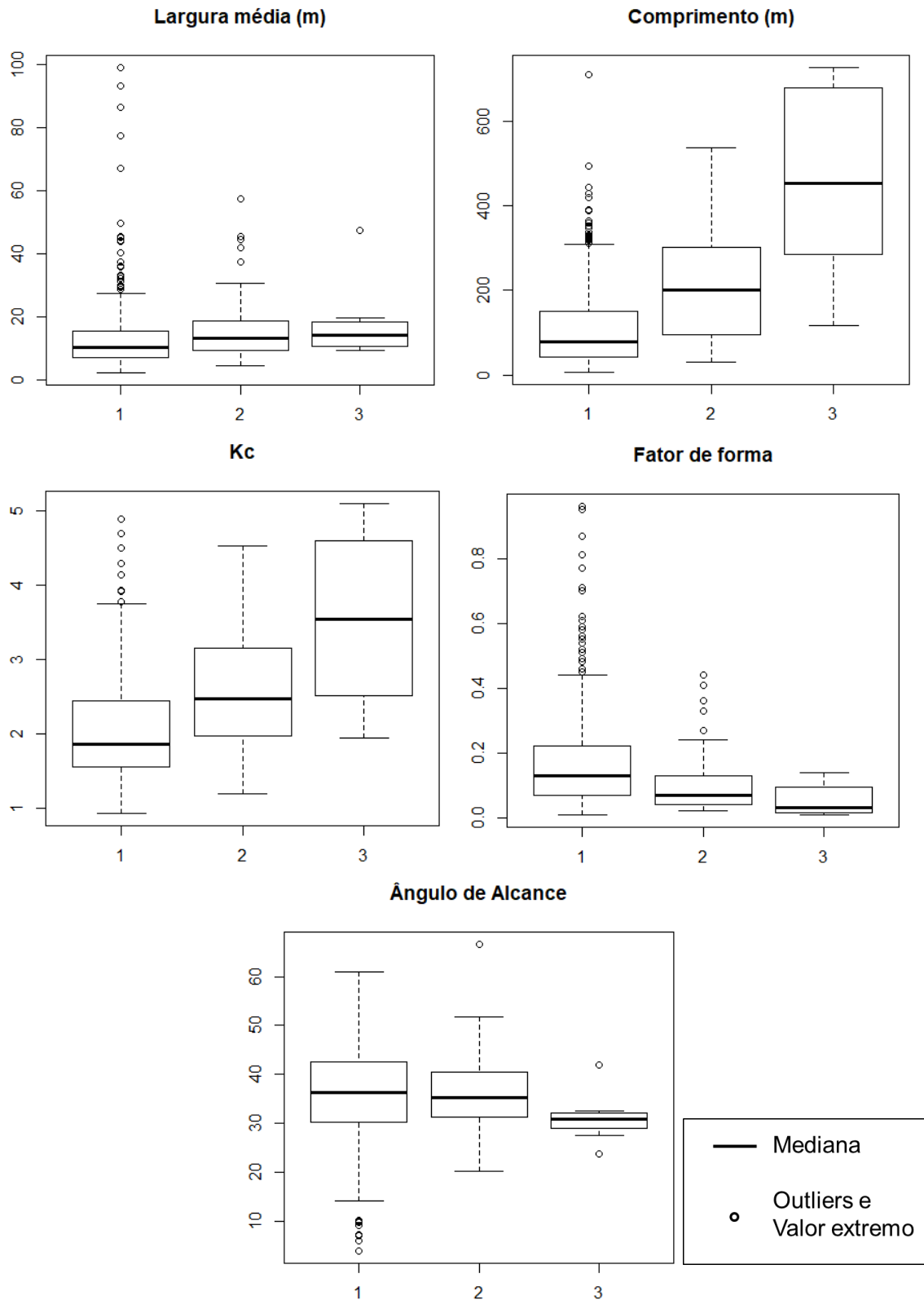


Figura 38. *Boxplot* dos parâmetros de análise morfométrica em função da hierarquia das cicatrizes.

Entre os parâmetros morfométricos apresentados, os valores médios, em geral, estão inseridos no intervalo de valores trazidos da literatura. A área média de 1282 m<sup>2</sup> é consoante ao limiar de 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>, considerado o mais recorrente para fluxos de detritos (TSENG et al., 2013). Não obstante a maior parte das cicatrizes esteja incluída nessa faixa de valores, introduzindo os valores extremos na análise a média passa a ser 2045 m<sup>2</sup>, e abrange uma cicatriz de 22455 m<sup>2</sup> de área. Já a largura média dos fluxos, igual a 12 metros, fica abaixo do limiar de 20 metros trazido por Dai e Lee (2001), a partir do qual são caracterizados fluxos de detritos largos. No entanto, as máximas larguras considerando os valores extremos chegam a 100 metros.

Comparando os valores obtidos com Schwarz (2019), onde foi disponibilizado um inventário das cicatrizes ocorridas na bacia do rio Mascarada, as médias e máxima são relativamente menores. No entanto, ambas as metodologias utilizadas por Schwarz (2019) para delimitação das cicatrizes diferem deste trabalho, sugerindo uma superestimação, especificamente quanto à área afetada e o alcance das cicatrizes.

O parâmetro com maior discrepância de valores da literatura é o ângulo de alcance, que por sua vez está fortemente atrelado ao alcance máximo do fluxo de detritos. O ângulo de alcance é considerado um parâmetro pertencente ao fluxo de detritos em particular, no entanto, reflete significativamente as características da bacia. O conjunto de valores obtidos para as cicatrizes correspondem majoritariamente a um mesmo intervalo em torno do valor médio de 36°, considerado bastante elevado para fluxos de detritos. No entanto, as cicatrizes provenientes de fluxos múltiplos, por ter o limite do alcance arbitrariamente interrompido, contribuíram para os valores mais elevados. Apesar disso, o valor médio do ângulo de alcance das cicatrizes de primeira ordem segue muito próximo das médias de cicatrizes de ordem mais elevada.

A área de ocorrência dos fluxos na bacia apresenta vales bem encaixados e vertentes de elevada declividade, em decorrência dessa condição o trajeto dos fluxos de detritos que atingem o canal, mesmo os de encosta aberta (Figura 39), pode ser precocemente interrompido, enquanto que parte do material passa a ser carregado pelo canal de drenagem. De fato, embora a maior parte das cicatrizes mapeadas não percorra distâncias acima de 1 km, além do exutório da bacia foi registrado o transporte de grande quantidade de sedimento, com altas

concentrações. No entanto, esse fluxo a jusante do exutório é decorrente do acúmulo de material de diversas cicatrizes a montante, e não apenas de um fluxo.



Figura 39. Fluxos de encosta aberta que atingiram o canal.

O comprimento do fluxo de detritos, embora seja um dos parâmetros mais fáceis de obter operacionalmente, pode ser o parâmetro com maior grau de incerteza associado. A identificação dos limites da zona de deposição, mesmo com observações em campo, incorpora certo grau de subjetividade, uma vez que grande parte dos fluxos de detritos adentrou na rede de drenagem. Dessa forma, os valores de ângulo de alcance foram mais elevados, enquanto que o comprimento foi relativamente reduzido se compararmos ao alcance máximo de 12.7 km (RICKENMANN, 2005). Não obstante, Tseng et al. (2013) e Chen et al. (2009), respectivamente, indicam que em média os fluxos de detritos não ultrapassam os 200 e 300 metros de comprimento, concordante com a média de 122 metros na bacia do rio Mascarada.

A diversidade na morfologia dos fluxos de detritos pode ser identificada principalmente pela dispersão dos valores dos parâmetros das cicatrizes de primeira ordem, com extremos muito acima da média das cicatrizes. A comparação entre os fluxos ressalta a maior variabilidade nos fluxos de primeira ordem, uma vez que abrangem tanto fluxos múltiplos quanto fluxos individuais. Evidentemente, os fluxos de maior ordem apresentam maiores valores de comprimento e, conseqüentemente, área e perímetro. No entanto, ao analisarmos a largura média dos fluxos de detritos

em cada ordem, observamos uma tendência dos maiores valores em fluxos de primeira ordem. Em geral, as maiores larguras de fluxos estão associadas a fluxos de detritos de encosta aberta, sugerindo uma predominância desse tipo de fluxo hierarquizado como de primeira ordem.

As variáveis geralmente utilizadas na caracterização de bacias hidrográficas, o coeficiente de compacidade e o fator de forma, apontam uma tendência inversamente proporcional entre a ordem dos fluxos de detritos. Essa tendência evidencia o formato mais alongado das cicatrizes de maior ordem, e um formato mais arredondado nas cicatrizes de primeira ordem. Analogamente às características de propagação de cheias em bacias hidrográficas, essa condição pode ressaltar uma maior tendência de fluxos de detritos de primeira ordem, representados por valores mais baixos do coeficiente de compacidade, e valores mais próximos de 1 do fator de forma, em mobilizar e despejar no canal de maneira imediata uma maior quantidade de sedimentos. Por sua vez, essa grande quantidade de material pode resultar em uma maior possibilidade de bloqueio do vale e na formação de barragens naturais.

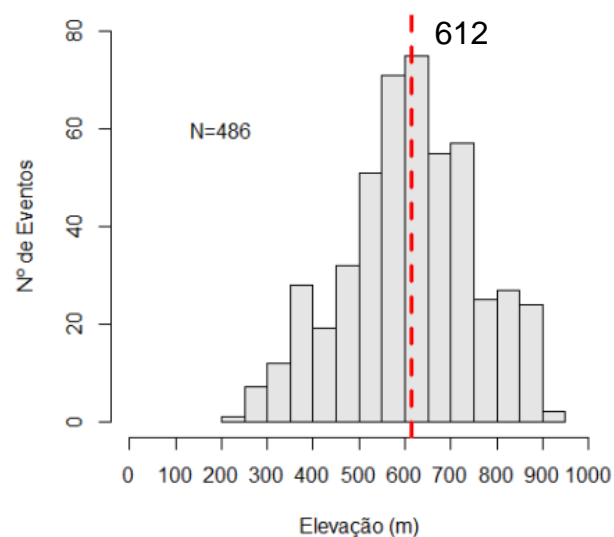
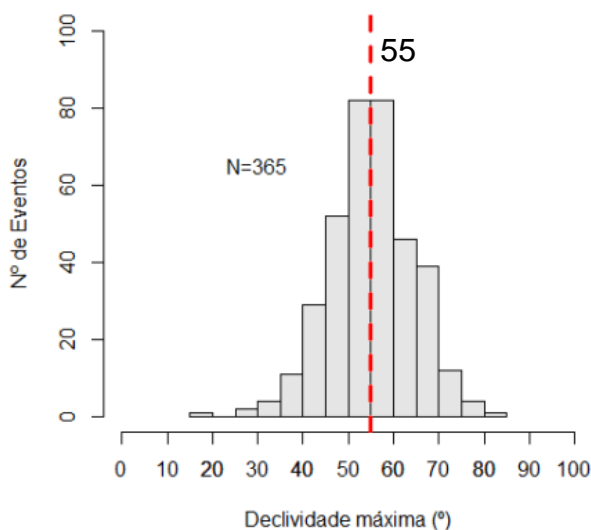
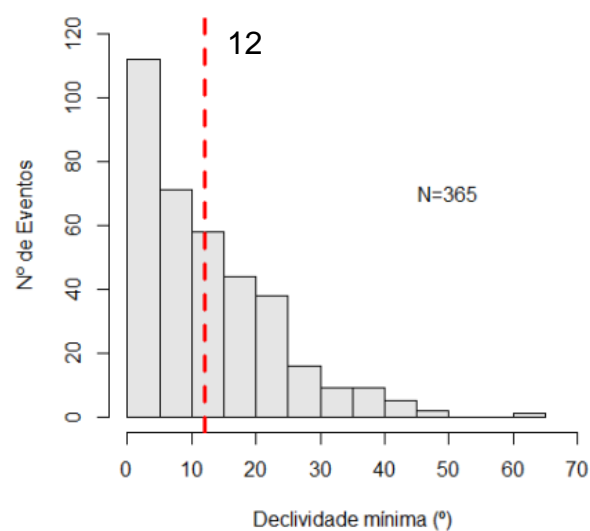
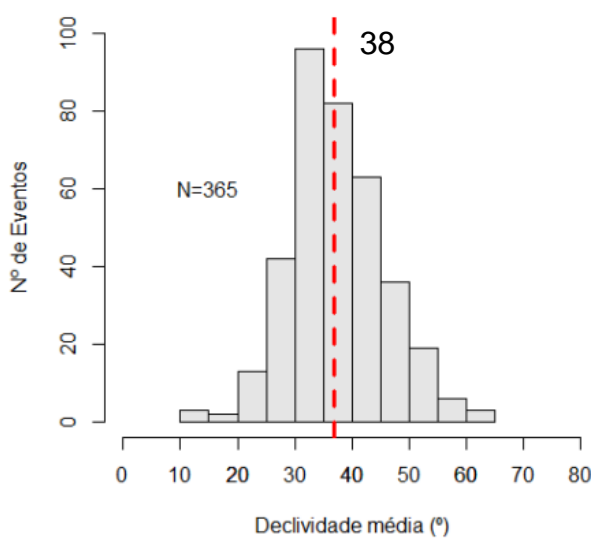
### **6.1.3. Análises Geomorfológicas**

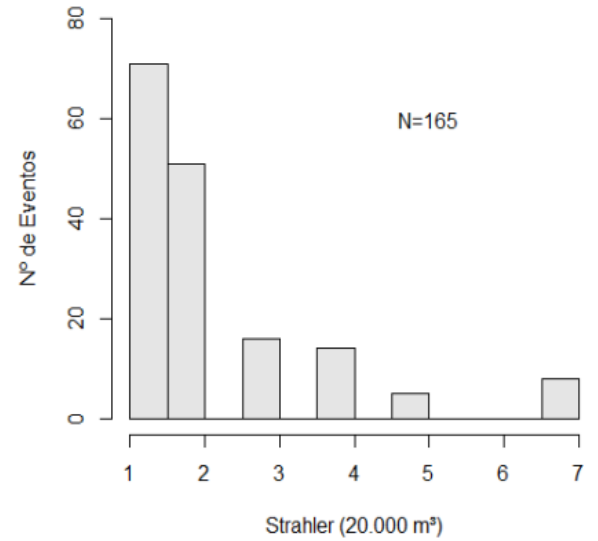
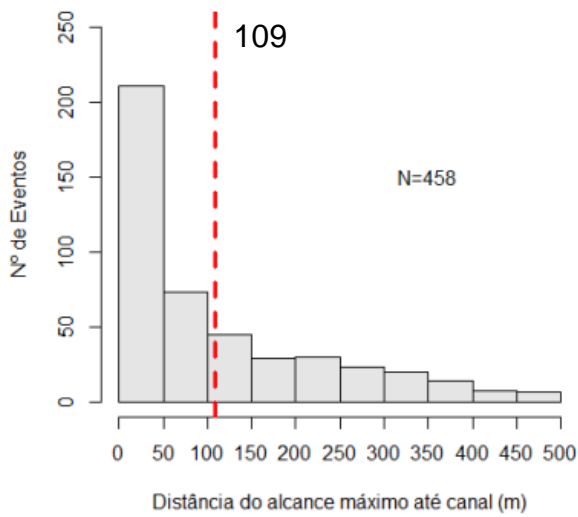
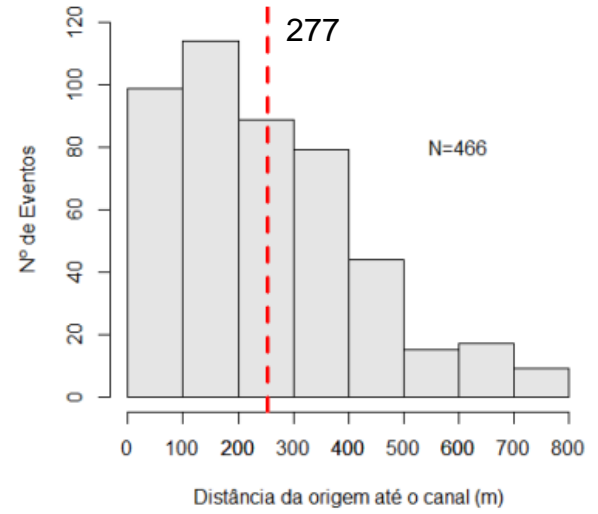
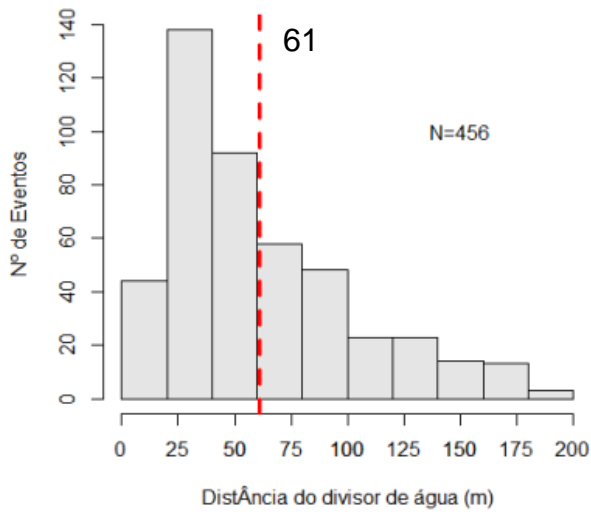
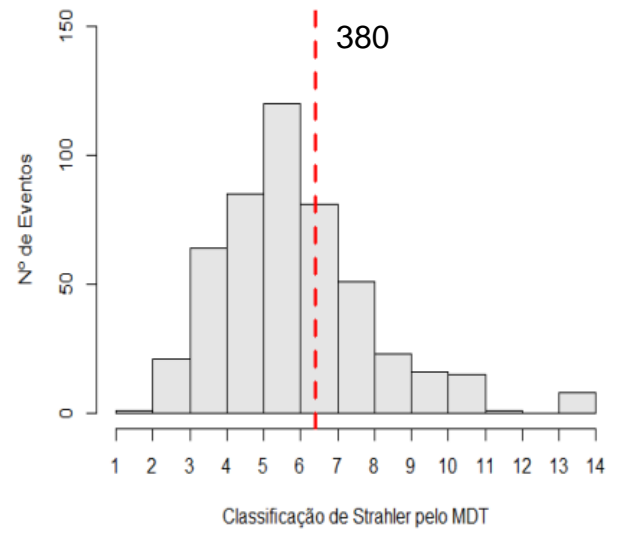
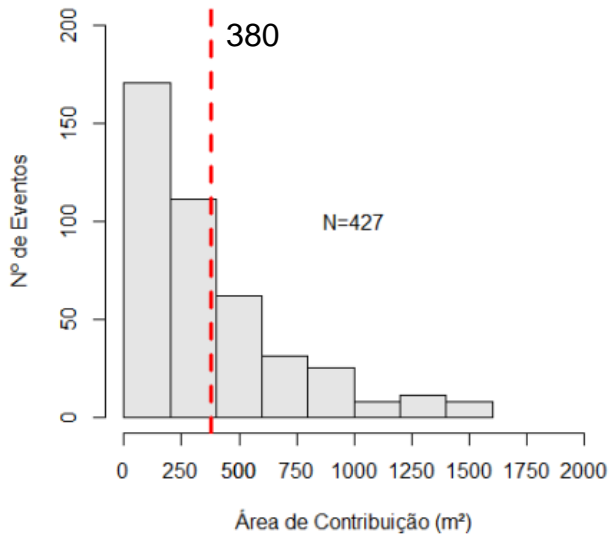
As análises dos parâmetros geomorfológicos estão representadas pelos histogramas da Figura 40, desconsiderando os valores *outliers*, e pelos *boxplot* da Figura 41, em função da hierarquização das cicatrizes. Uma grande limitação associada às análises geomorfológicas, que derivam do MDT da bacia, é a data de obtenção do MDT posteriormente a ocorrência das cicatrizes. Em função disso, a formação de vertentes preferencias e alterações da curvatura da encosta podem influenciar consideravelmente nos resultados.

Variações de uso das métricas e a própria variação associada a cada base de dados resulta em diferenças significativas nos resultados. O inventário das cicatrizes da bacia do rio Mascarada, elaborado por Schwarz (2019), embora considere o mesmo evento, reflete em variações das características predominantes. De forma que, ressalta-se a necessidade de padronização na elaboração de inventários e na própria caracterização das cicatrizes. Ainda assim, as características geomorfológicas apresentam maior similaridade com o inventário de Schwarz

(2019), com concordância na orientação preferencial das cicatrizes, e proximidades entre estimativas envolvendo altimetria e declividades.

Da mesma forma, as caracterizações trazidas por Cardozo et al. (2018) e Cardozo et al. (2021) diferem em algumas análises. O inventário de cicatrizes utilizado pelos autores superestima as dimensões das cicatrizes em comparação ao inventário utilizado neste trabalho. Essa condição reflete especialmente nos parâmetros que consideram o alcance do fluxo de detritos, particularmente em relação aos fluxos que atingiram o canal de drenagem, e até qual ordem de rio na classificação de Strahler foi alcançada.







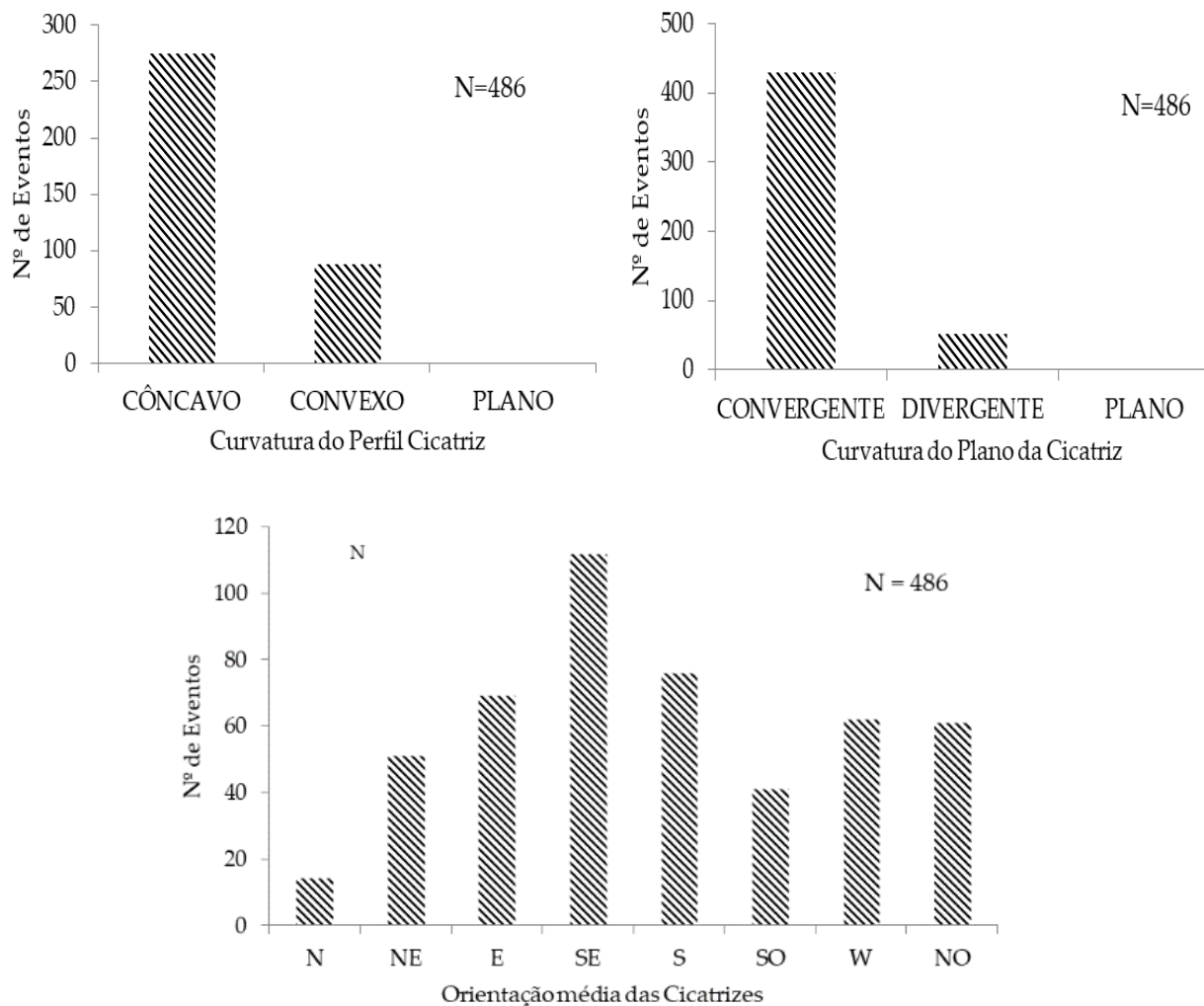
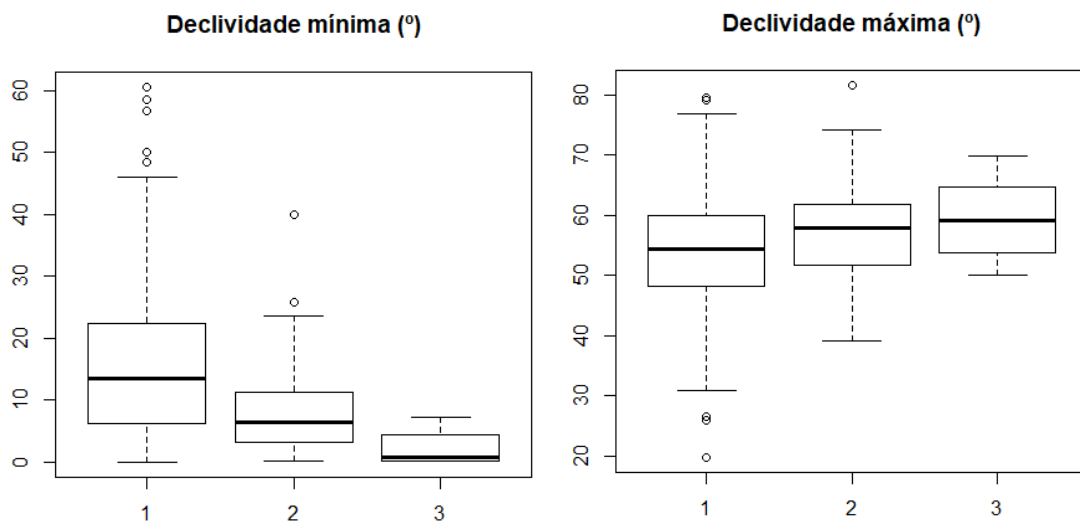


Figura 40. Histogramas de caracterização dos parâmetros geomorfológicos das Cicatrizes.



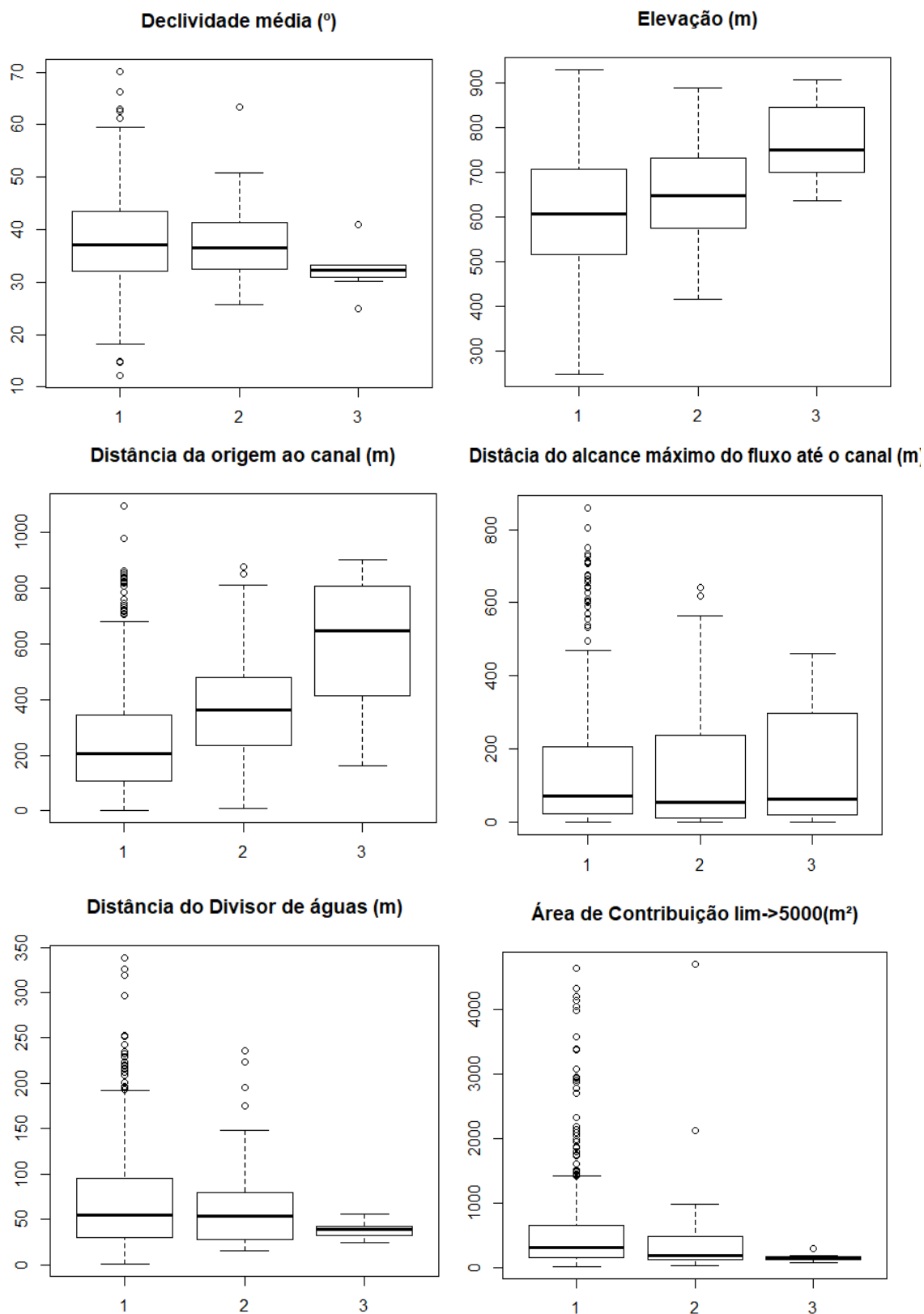


Figura 41. *Boxplot* dos parâmetros de análise geomorfológica da cicatriz.

Embora as bacias com maior propensão a ocorrência de fluxos de detritos apresentem uma certa tipificação, a faixa de valores de incidência dos fluxos é

bastante abrangente. A predominância dos fluxos sobre encostas orientadas para sudeste pode ser identificada nessa bacia, sendo um fator de grande influência na retenção de umidade do solo e, portanto, nas condições de estabilidade da encosta.

Os valores de declividade média do fluxo apresentam uma média de 37°, sendo que para a zona de propagação os valores trazidos por Lorente et al. (2001) variam de 30° a 45°. Os valores de declividade máxima, apresentam uma distribuição normal, com média de 55°, considerado um limiar bastante elevado, uma vez que áreas de maior declividade apresentam menor acúmulo de material, dificultando o desenvolvimento dos fluxos. Já os valores mínimos da declividade, representados com uma assimetria positiva dos dados, apresentam valores extremos muito reduzidos, resultantes de baixas declividades localizadas pontualmente na cicatriz ou em trechos menos declivosos sobre o canal de drenagem. A Figura 42 apresenta o valor máximo de declividade para cada trecho espaçado em 20 metros a partir da origem da cicatriz. Embora não tenha sido possível identificar a separação das zonas de iniciação, propagação e deposição, é possível identificar uma tendência de redução das declividades seguindo o percurso de propagação do fluxo a partir da origem.

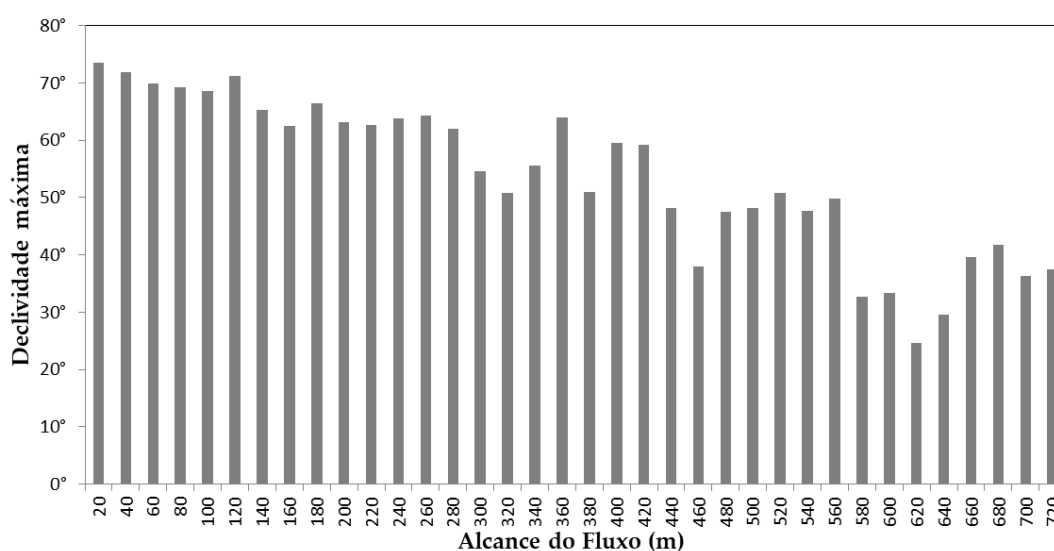


Figura 42. Máxima declividade em cada trecho da cicatriz.

A iniciação dos fluxos de detritos, em mais de 75% das cicatrizes, ocorreu na faixa de elevação entre 500 e 800 metros. A interface entre os derrames de rochas ácidas e básicas da formação Serra Geral incidentes sobre a região frequentemente ocorre em torno dos 500 metros de altimetria. Conforme trazido por Azambuja et al.

(2001) a interface entre os derrames apresenta grande interferência quanto a ocorrência de fluxos de detritos. Enquanto rochas ácidas apresentam maior resistência à erosão, os derrames basálticos são mais dissecados resultando em uma quebra de relevo e proporcionando grande energia e velocidade às vertentes dos fluxos.

A área de contribuição sobre a região de origem dos fluxos, em 60% das cicatrizes foi de até 300 m<sup>2</sup>. Segundo a classificação de Strahler a partir de um limiar de 20000 m<sup>2</sup>, a maior parte dos canais de drenagem inseridos sobre a delimitação da cicatriz eram de primeira ou segunda ordem, atingindo no máximo a ordem 7. A classificação da drenagem sem um limiar de contribuição mínima resultou em uma hierarquia de drenagem melhor distribuída, sendo mais de 90% das cicatrizes com valores de até ordem 9.

Em concordância às menores ordens da rede de drenagem, a área de iniciação dos fluxos apresenta uma distância média de 61 metros do divisor de águas, com um valor máximo de 185 metros. Pelo valor médio de cada ordem da cicatriz é possível observar um aumento gradativo da distância média da origem até o canal nas maiores ordens de fluxo de detritos, e uma proximidade com a divisor de águas. Essa condição caracteriza os fluxos de maior ordem como os principais fluxos, com áreas de iniciação mais a montante e maior alcance.

As análises de curvatura, tanto do perfil como do plano, indicam maior incidência das cicatrizes em áreas de concavidade positiva e convergência da vertente. No entanto, muitos estudos apontam a predominância de curvaturas planas, especialmente quanto à ocorrência de fluxos de detritos de encosta aberta. Portanto, o MDT obtido posteriormente ao evento pode ter favorecido as condições de convergência e concavidade em função da própria escavação do terreno pelo fluxo de detritos.

Variáveis como a área de contribuição quando obtidas sobre o canais de drenagem de maior ordem acabam resultando em valores muito discrepantes com a maior parte dos dados, e provavelmente associados a cicatrizes que foram de fato delimitadas sobre o canal, mas que na realidade podem ter sido contaminadas pela zona de passagem de convergência de fluxos de detritos a montante. Por conseguinte, foram desconsiderados os valores extremos, impondo um limiar de 5000 m<sup>2</sup>, sendo que a maior parte dos dados tinham suas áreas de iniciação sobre áreas de contribuição de até 1000 m<sup>2</sup>.

#### 6.1.4. Correlações

A tabela de correlações entre os parâmetros de todas as cicatrizes está apresentada na Figura 43. Os valores mais significativos foram entre as variáveis morfométricas de área, largura, perímetro e comprimento, sendo a maior deles de 0.98 entre o comprimento e o perímetro da cicatriz. Essa correlação indica um formato mais alongado da cicatriz, concordando com a descrição de Guthrie et al. (2010), descrevendo larguras durante o percurso levemente abaixo da largura média do fluxo, resultando em morfologias estreitas e alongadas. Além disso, nas áreas de maior declividade, associadas às zonas de iniciação, as cicatrizes são descritas por apresentar larguras maiores (GUTHRIE et al., 2010), o que é corroborado pela correlação positiva da largura e declividade máxima. Essa condição descreve um comportamento dos fluxos canalizados, sugerindo possivelmente uma predominância desses fluxos na bacia. Além disso, por retratar principalmente a condição de zona de transporte dos fluxos, também sugere a ocorrência de fluxos parcialmente desenvolvidos, sem uma ampliação típica da largura ao final da zona de deposição. Por outro lado, a correlação positiva entre largura e área descreve uma tendência esperada dos fluxos de encosta aberta, com uma ampliação da largura com o aumento da área do fluxo. No entanto, a correlação da largura e do comprimento é muito baixa, indicando que esse comportamento não é observado em todas as cicatrizes.

O coeficiente de compacidade e o fator de forma também apresentam boas correlações, especialmente com os parâmetros a partir dos quais foram obtidos. O coeficiente de compacidade apresenta elevada correlação positiva com o perímetro e comprimento, indicando cicatrizes mais alongadas e com maior alcance, novamente corroborando a descrição de Guthrie et al. (2010) de cicatrizes longas e estreitas. Já o fator de forma apresentou uma correlação negativa com esses parâmetros, descrevendo o mesmo formato de cicatriz.

O comprimento da cicatriz ainda apresentou correlação positiva com a distância da origem do fluxo até o canal de drenagem, e negativa, embora muito baixa, com a distância do término da cicatriz até o canal de drenagem. A segunda condição indica que fluxos mais longos tem maior alcance e, portanto, atingem o canal com maior facilidade. No entanto, a correlação positiva do alcance do fluxo com a distância do canal indica que cicatrizes de menor comprimento, e consequentemente de maior

ordem, ocorrem com maior proximidade do canal principal, enquanto que as cicatrizes de ordem principal iniciam em áreas mais a montante, e portanto com maiores distâncias da rede de drenagem principal da bacia.

Entre os parâmetros geomorfológicos a declividade apresentou as maiores correlações entre os valores mínimo, médio e máximo. Além disso, a declividade mínima apresentou uma correlação inversamente proporcional com o comprimento, perímetro, coeficiente de compacidade e classificação de Strahler pelo MDT. Indicando que as cicatrizes mais longas, que atingiram maior alcance consequentemente alcançaram áreas de menor declividade.

Outra correlação destacada é a relação inversamente proporcional entre as curvaturas, indicando uma tendência das cicatrizes com maior convergência em apresentar um perfil mais côncavo, enquanto que cicatrizes com direcionamento divergente da vertente, uma tendência de perfil convexo. Essa condição poderia ser mais bem representada com MDT anterior a ocorrência dos fluxos, trazendo maior confiabilidade para identificar a contribuição desse parâmetro na ocorrência do tipo de fluxo de detritos.

	Largura	Área Total	Comprimento	Perímetro	Declividade mínima	Declividade máxima	Declividade média	Curvatura do perfil	Curvatura do Plano	Elevação	Distância do divisor de águas	Distância da origem ao canal	Distância do alcance máximo ao canal	Coefficiente de Compacidade	Fator de Forma	Área de Contribuição	Classificação do MDT por Strahler
Largura	<b>1.0000</b>	0.6934	0.2017	0.3298	-0.1585	0.3799	0.1998	0.0291	-0.0355	-0.0236	0.0106	0.1150	-0.0826	-0.1926	0.3022	-0.0305	0.2776
Área Total	0.6934	<b>1.0000</b>	0.6991	0.7880	-0.3742	0.3200	-0.0181	-0.0863	0.0222	0.1795	-0.1376	0.3732	-0.1101	0.2650	-0.1175	-0.0489	0.4034
Comprimento	0.2017	0.6991	<b>1.0000</b>	0.9774	-0.5264	0.2081	-0.2390	-0.1472	-0.0335	0.3092	-0.2396	0.5175	-0.1029	0.7894	-0.5193	-0.0628	0.3905
Perímetro	0.3298	0.7880	0.9774	<b>1.0000</b>	-0.5308	0.2646	-0.1903	-0.1336	-0.0404	0.2791	-0.2276	0.5063	-0.1160	0.7452	-0.4386	-0.0659	0.4346
Declividade mínima	-0.1585	-0.3742	-0.5264	-0.5308	<b>1.0000</b>	0.0736	0.6125	-0.0291	0.0480	-0.2286	0.3057	-0.2185	0.1070	-0.4577	0.3842	-0.0226	-0.4620
Declividade máxima	0.3799	0.3200	0.2081	0.2646	0.0736	<b>1.0000</b>	0.7077	0.1373	-0.0745	-0.0983	0.0647	0.0374	-0.1703	0.0280	-0.0009	-0.0636	0.1506
Declividade média	0.1998	-0.0181	-0.2390	-0.1903	0.6125	0.7077	<b>1.0000</b>	0.0406	-0.0062	-0.2589	0.1978	-0.1498	-0.0794	-0.3260	0.2556	-0.0358	-0.2181
Curvatura do perfil	0.0291	-0.0863	-0.1472	-0.1336	-0.0291	0.1373	0.0406	<b>1.0000</b>	-0.3927	-0.1402	0.1366	-0.1226	-0.0477	-0.1608	0.1861	0.0383	0.0232
Curvatura do Plano	-0.0355	0.0222	-0.0335	-0.0404	0.0480	-0.0745	-0.0062	-0.3927	<b>1.0000</b>	0.0748	-0.1185	-0.0270	0.0012	-0.0337	-0.0379	-0.2205	-0.3225
Elevação	-0.0236	0.1795	0.3092	0.2791	-0.2286	-0.0983	-0.2589	-0.1402	0.0748	<b>1.0000</b>	-0.1806	0.4647	0.3275	0.2612	-0.2503	-0.0625	0.1181
Distância do divisor de águas	0.0106	-0.1376	-0.2396	-0.2276	0.3057	0.0647	0.1978	0.1366	-0.1185	-0.1806	<b>1.0000</b>	0.0315	0.2045	-0.2444	0.2741	0.0335	-0.1678
Distância da origem ao canal	0.1150	0.3732	0.5175	0.5063	-0.2185	0.0374	-0.1498	-0.1226	-0.0270	0.4647	0.0315	<b>1.0000</b>	0.7603	0.4174	-0.2714	-0.1145	0.0406
Distância do alcance máximo ao canal	-0.0826	-0.1101	-0.1029	-0.1160	0.1070	-0.1703	-0.0794	-0.0477	0.0012	0.3275	0.2045	0.7603	<b>1.0000</b>	-0.0432	0.0185	-0.0732	-0.2308
Coefficiente de Compacidade	-0.1926	0.2650	0.7894	0.7452	-0.4577	0.0280	-0.3260	-0.1608	-0.0337	0.2612	-0.2444	0.4174	-0.0432	<b>1.0000</b>	-0.6871	-0.0612	0.2743
Fator de Forma	0.3022	-0.1175	-0.5193	-0.4386	0.3842	-0.0009	0.2556	0.1861	-0.0379	-0.2503	0.2741	-0.2714	0.0185	-0.6871	<b>1.0000</b>	0.0487	-0.1793
Área de Contribuição	-0.0305	-0.0489	-0.0628	-0.0659	-0.0226	-0.0636	-0.0358	0.0383	-0.2205	-0.0625	0.0335	-0.1145	-0.0732	-0.0612	0.0487	<b>1.0000</b>	0.1532
Classificação do MDT por Strahler	0.2776	0.4034	0.3905	0.4346	-0.4620	0.1506	-0.2181	0.0232	-0.3225	0.1181	-0.1678	0.0406	-0.2308	0.2743	-0.1793	0.1532	<b>1.0000</b>

Figura 43. Correlação entre todas as variáveis.

### 6.1.5. Análise de Componentes Principais

Além das análises de correlação, onde é possível identificar alguns parâmetros com maior dependência entre si, foi feita uma análise de componentes principais entre as variáveis apresentadas. O gráfico gerado pelas duas componentes principais da análise está apresentado na Figura 44, onde é possível identificar um acúmulo dos pontos no terceiro quadrante, considerando um plano cartesiano, que indica a menor representatividade das amostras por ambas as componentes 1 e 2.

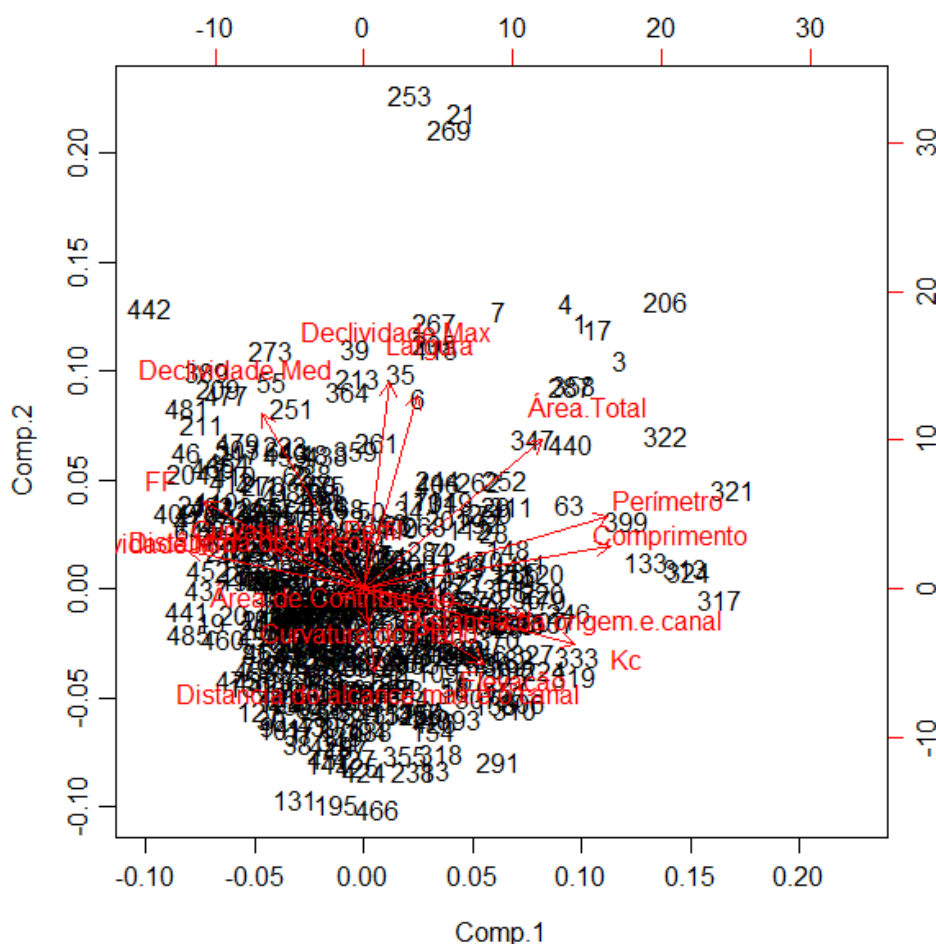


Figura 44. Diagrama da ACP considerando distribuição com os 2 eixos principais.

A variância acumulada de 50% das amostras é atingida considerando o uso de 8 componentes, enquanto que as duas primeiras representam apenas 12.6% da variabilidade dos dados. Mesmo com baixa representatividade, a Tabela 19 indica os pesos associados a cada variável da componente. É possível identificar as variáveis



de comprimento, perímetro, largura, área e declividade como as mais representativas dentro de cada componente.

Essa análise apresenta a enorme variabilidade dos fluxos de detritos, mesmo ocorridos em um mesmo evento, e a dificuldade em caracterizar o movimento como um todo, sem identificar singularidades que permitam agrupar esse conjunto de ocorrências em grupos de maior similaridade.

Tabela 19. *Loadings* da cada componente principal da análise.

<b>Parâmetro</b>	<b>Componente 1</b>	<b>Componente 2</b>
Largura		0.470
Área Total	0.316	0.360
Comprimento	0.436	0.103
Perímetro	0.432	0.174
Declividade mín	-0.311	0.000
Declividade máx		0.500
Declividade média	-0.181	0.426
Curvatura do Perfil		0.118
Curvatura do Plano		
Elevação	0.213	-0.180
Distância do Divisor de água	-0.160	
Distância da origem ao canal	0.283	
Distância do alcance máx ao canal		-0.201
Kc	0.373	-0.133
FF	-0.286	0.210
Área de Contribuição		

## **6.2. Classificações quanto ao grau de confinamento**

### **6.2.1. Classificação com base nas SU**

A criação automatizada das unidades de encosta (SU) na região de ocorrência das cicatrizes resultou em 13706 unidades, em uma área de 102 km<sup>2</sup> (Figura 45). A área média das SU é de aproximadamente 7500 m<sup>2</sup>, sendo a área máxima de uma única SU igual a 140 mil m<sup>2</sup>. As cicatrizes na bacia incidiram sobre 751 unidades de encosta, das quais a área média é de 20 mil m<sup>2</sup>. A classificação das cicatrizes, conforme a metodologia proposta por Marchesini et al. (2020), resultou em 260 fluxos de detritos de encosta aberta e 227 fluxos de detritos canalizados.

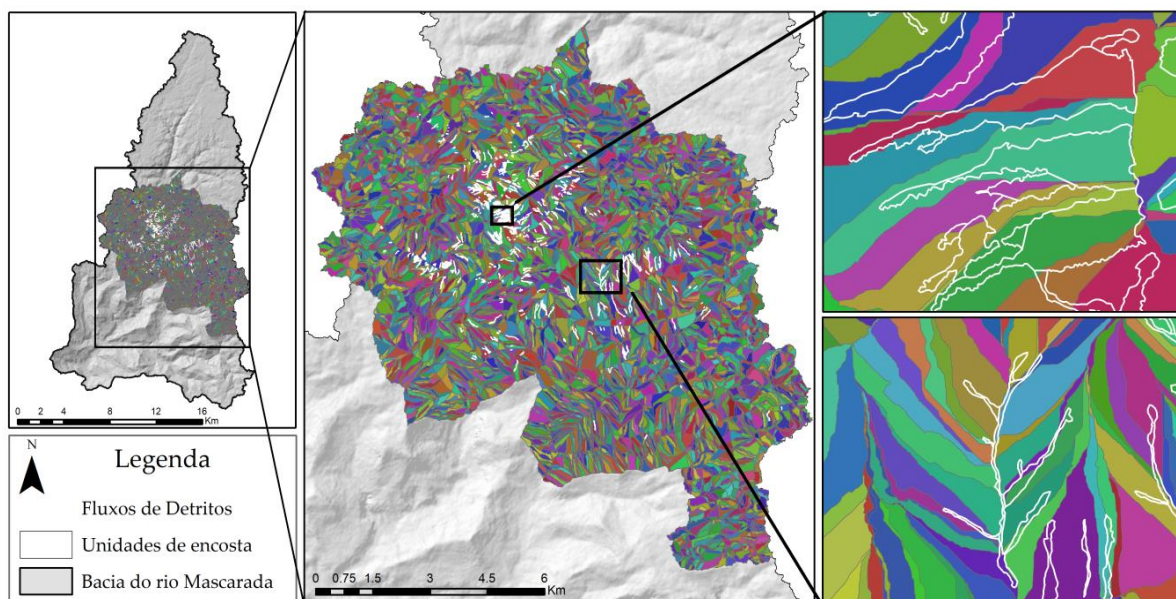


Figura 45. Unidades de Encosta geradas na área de incidência de cicatriz, cujos limites são delimitados pelas diferentes cores do mapa.

A Tabela 20 indica alguns valores dos parâmetros considerados mais representativos do tipo de fluxo. O comportamento esperado são fluxos canalizados com menores áreas e larguras, e comprimentos maiores em comparação aos fluxos de encosta aberta, no entanto, é observado um comportamento contrário. Além disso, a constatação em campo de cicatrizes reconhecidas como de encosta aberta e canalizadas, não foi condizente com a classificação realizada através das SU. A principal limitação do método consiste na definição dos parâmetros para criação das SU resultando em variações significativas nos resultados, principalmente por variações em função do fator de escala e de diferentes graus de confinamento do terreno, subestimando ou superestimando as repartições. Em vista disso, a metodologia utilizada para classificação das cicatrizes com base nas unidades de encosta, foi considerada inadequada na representação dos fluxos de detritos da bacia do rio Mascarada.

Tabela 20. Parâmetros analisados quanto as cicatrizes classificadas por SU.

Parâmetro	Fluxos de Detritos de Encosta Aberta			Fluxos de Detritos Canalizados		
	média	min	máx	média	min	máx
Largura (m)	11.3	2.2	57.3	15.9	3.5	99.9
Área Total (m <sup>2</sup> )	1086	20	12050	3136	75	22455
Comprimento (m)	89	7	353	186	12	727

### 6.2.2. Classificação Proposta com base na Propagação do Fluxo de Detritos

A classificação proposta quanto ao grau de confinamento do fluxo de detritos é baseada no comportamento de propagação do movimento. A análise de agrupamento considerando o expoente da equação de regressão potencial e o coeficiente de correlação da equação resultou no cluster representado pelo dendrograma da Figura 46. A identificação dos grupos foi feita com base nos valores médio, mínimo e máximo do expoente das regressões dentro de cada agrupamento (Tabela 21).

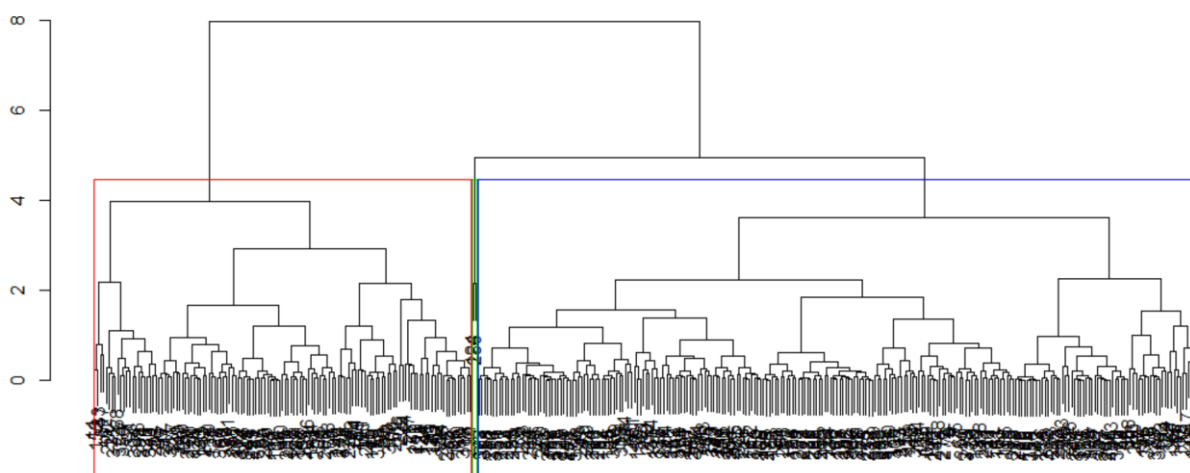


Figura 46. Cluster para separação dos tipos de fluxo de detritos, onde cada numeração do eixo das abscissas representa uma única cicatriz.

Tabela 21. Estatística do valor do expoente da equação de regressão

Cluster	Médio	Mínimo	Máximo	Classe	N
1	1.54	1.18	2.44	Encosta Aberta	107
2	1.03	0.48	1.35	Canalizados	211
3	-0.16	-0.18	-0.14	Transição	2

A classificação resultou em 211 cicatrizes de fluxos de detritos canalizados e quase a metade de cicatrizes de fluxos de detritos de encosta aberta, com 107 cicatrizes no agrupamento. Apenas duas cicatrizes foram classificadas como fluxos de detritos de transição, sendo desconsideradas das análises, justamente por não apresentarem um padrão de comportamento, mas uma condição independente.

Considerando o limiar definido em 60 metros para classificação de fluxos de detritos desenvolvidos, foram ainda classificadas 164 cicatrizes como fluxos de detritos não desenvolvidos. A Figura 47 apresenta a classificação final das cicatrizes dos fluxos de detritos na bacia do rio Mascarada, com 107 fluxos de detritos de encosta aberta, 211 fluxos de detritos canalizados e 164 fluxos de detritos não desenvolvidos, independentemente da classificação do tipo. A Figura 48 apresenta duas encostas da bacia, onde além da classificação proposta, foram visualmente consideradas com ocorrência de fluxo detritos de encosta aberta (Figura 48a) e canalizado (Figura 48b).

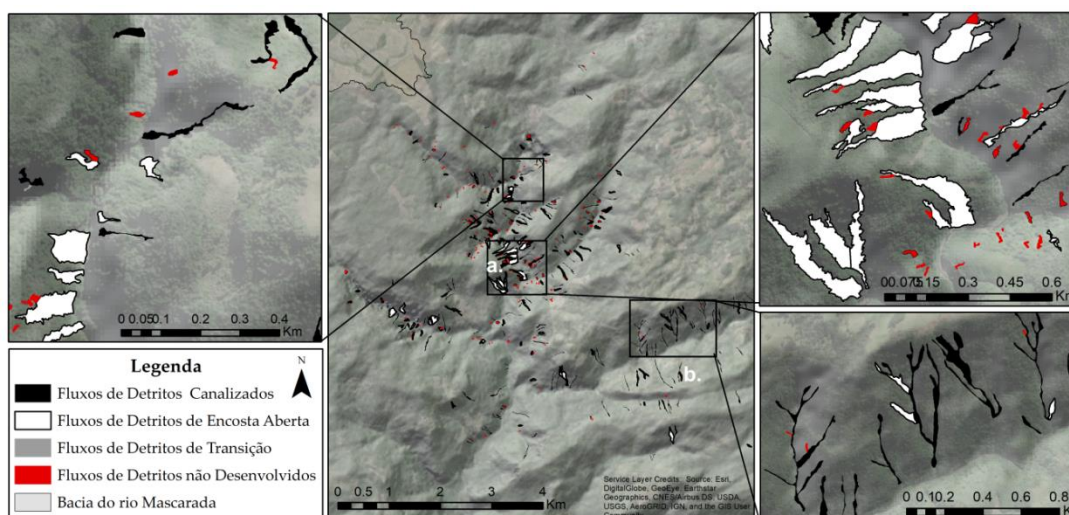


Figura 47. Cicatrizes da bacia do rio Mascarada classificadas.

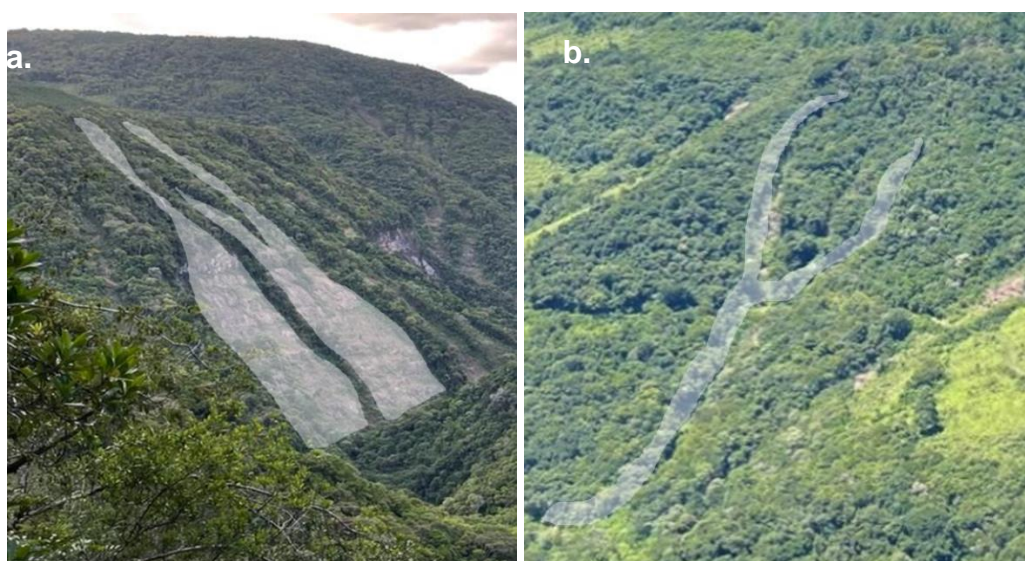


Figura 48. As imagens a. e b., de localização identificada na Figura 47, indicam respectivamente fluxos de detritos de encosta aberta e canalizado.

### 6.2.2.1. Propagação dos Fluxos de Detritos

A relação da largura máxima em função do comprimento de cada segmento de cicatriz, considerando todos os fluxos de detritos, resulta em uma relação inversamente proporcional (Figura 49). Essa tendência sugere uma drástica redução da largura com o aumento do comprimento da cicatriz. No entanto, após a classificação entre os tipos de fluxo, analisando a largura máxima por trecho é possível identificar dois comportamentos distintos (Figura 50). De fato, para fluxos canalizados, conforme trazido por Guthrie et al. (2010), as larguras tendem a iniciar maiores e seguem praticamente constantes, um pouco abaixo da largura média durante o trajeto de propagação.

A largura média em cada trecho de cicatriz apresenta um padrão com pouca variação nos fluxos de detritos canalizados (Figura 51). Essa condição sugere que fluxos canalizados são condicionados com maior peso pela morfologia da encosta e pela própria geometria do canal, de forma que, até uma determinada quantidade de material mobilizado, o fluxo permanece confinado. A incorporação ao canal de drenagem também evidencia um trajeto de percurso mais provável de ocorrer.

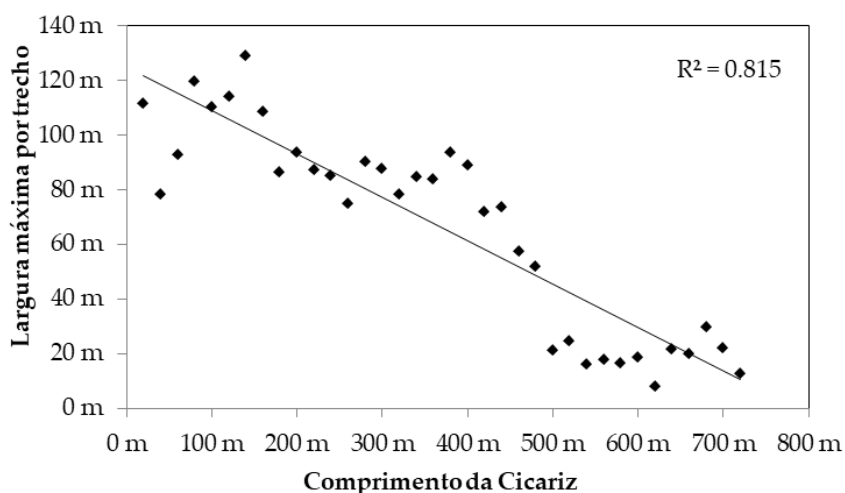


Figura 49. Largura máxima por trecho da cicatriz.

Além disso, a estabilização de um valor médio ao longo do comprimento da cicatriz, sem identificação de uma ampliação abrupta na largura do fluxo, sugere a ocorrência de fluxos de detritos canalizados parcialmente desenvolvidos. Tendo em vista as características geomorfológicas da região de ocorrência dos fluxos, com

vales encaixados e vertentes mais canalizadas, grande parte dos fluxos de detritos é incorporada ao canal de drenagem, e possivelmente transformada em uma inundação de detritos, responsável por grande parte das perdas e danos ocasionados em áreas mais a jusante.

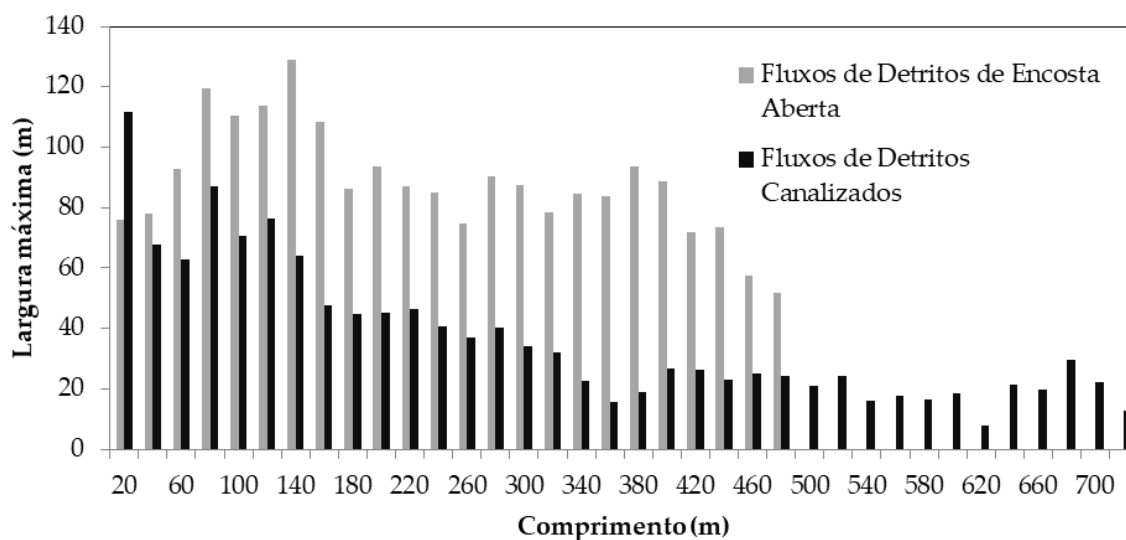


Figura 50. Largura máxima por trecho da cicatriz.

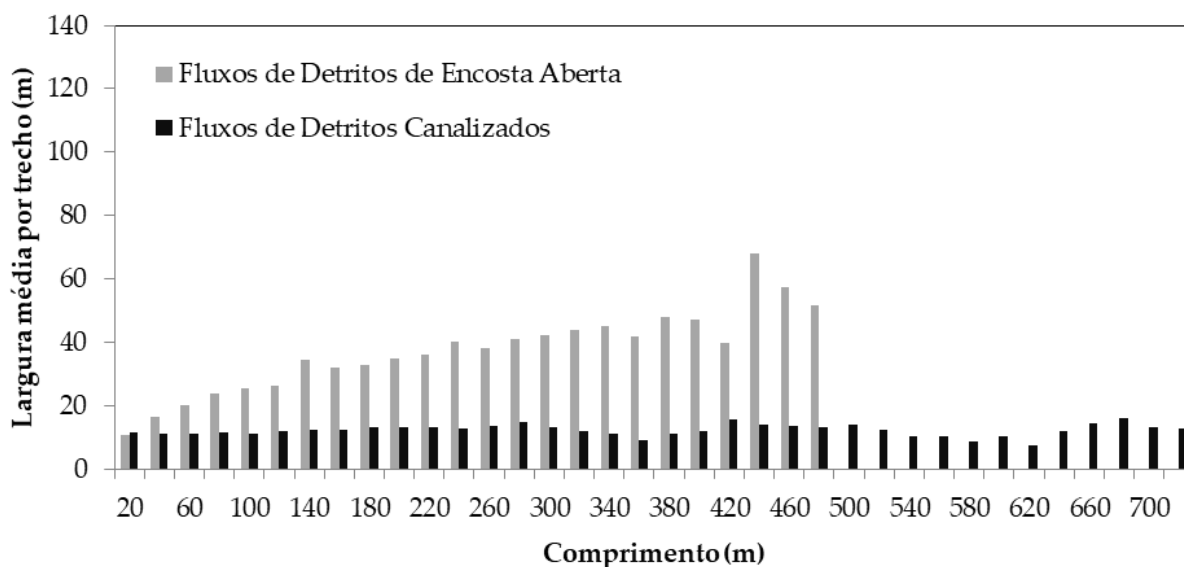


Figura 51. Largura média de cada trecho da cicatriz.

Para os fluxos de encosta aberta as larguras são consideravelmente maiores, e a tendência de ampliação das larguras com o comprimento do fluxo pode ser observada em função da largura média de cada trecho (Figura 51). Além de estar associada à abrangência da área de ruptura inicial do movimento, essa taxa de

ampliação pode estar mais associada, ou ser controlada principalmente pela hidrodinâmica do processo, em decorrência do nível de fluidificação do material e da reologia do fluxo. Devido a uma ausência de um confinamento em excesso na vertente do fluxo, a área afetada de fluxos de detritos de encosta aberta seria definida pela própria dispersão e alcance do fluxo na encosta. Já para os fluxos canalizados a morfologia apresenta maior influência sobre a delimitação da área afetada, principalmente no direcionamento e no alcance do fluxo, em geral com trajetos mais facilmente identificados a partir do trecho do canal de drenagem.

As larguras máximas dos fluxos de detritos de encosta aberta apresentam uma certa oscilação e uma pequena atenuação com o maior alcance do fluxo. Isso pode estar associado a cicatrizes com diferentes taxas de ampliação, obstruções no terreno com alteração do direcionamento do fluxo, ou ao próprio formato de deposição do material em algumas cicatrizes particularmente.

A condição de alargamento do fluxo de encosta aberta e a propagação de larguras médias relativamente estreitas para os fluxos canalizados também reflete na variação da área com o comprimento. A Figura 52 evidencia esses dois padrões de comportamento, onde é possível observar a ampliação da área afetada a montante a uma taxa relativamente maior para os fluxos de encosta aberta do que para os fluxos canalizados, que seguem uma ampliação mais gradual.

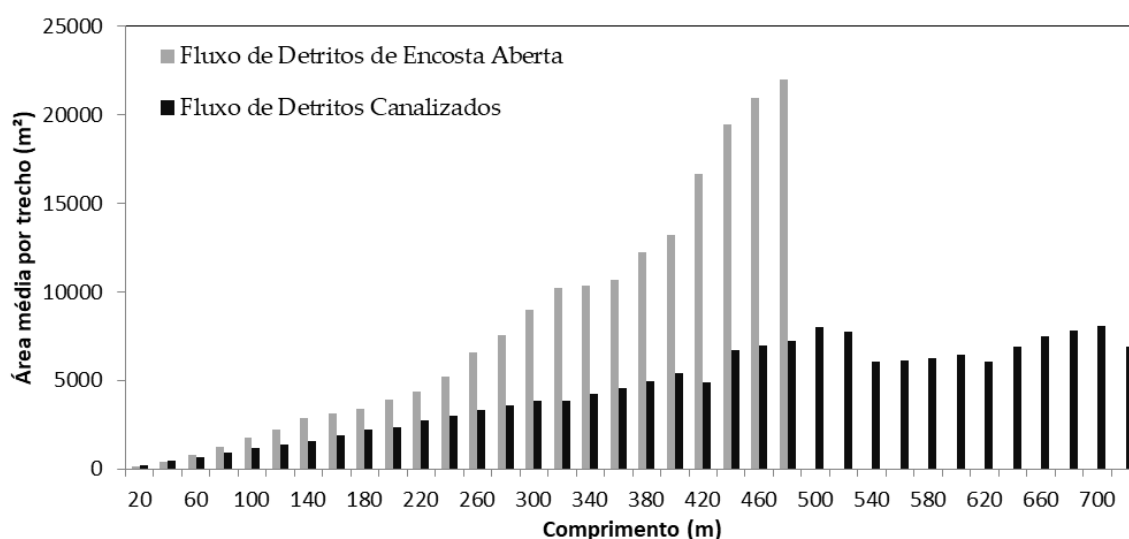
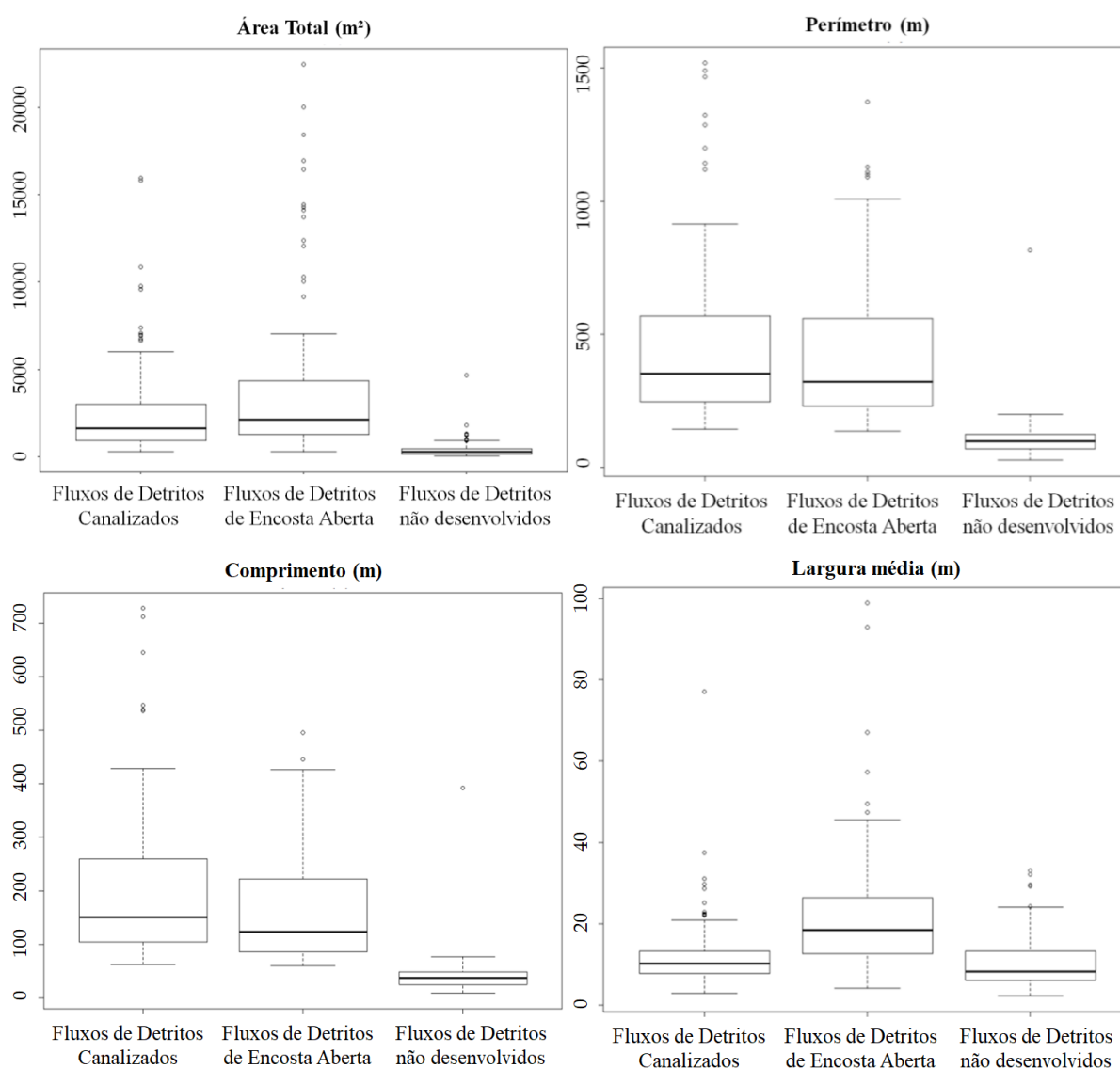


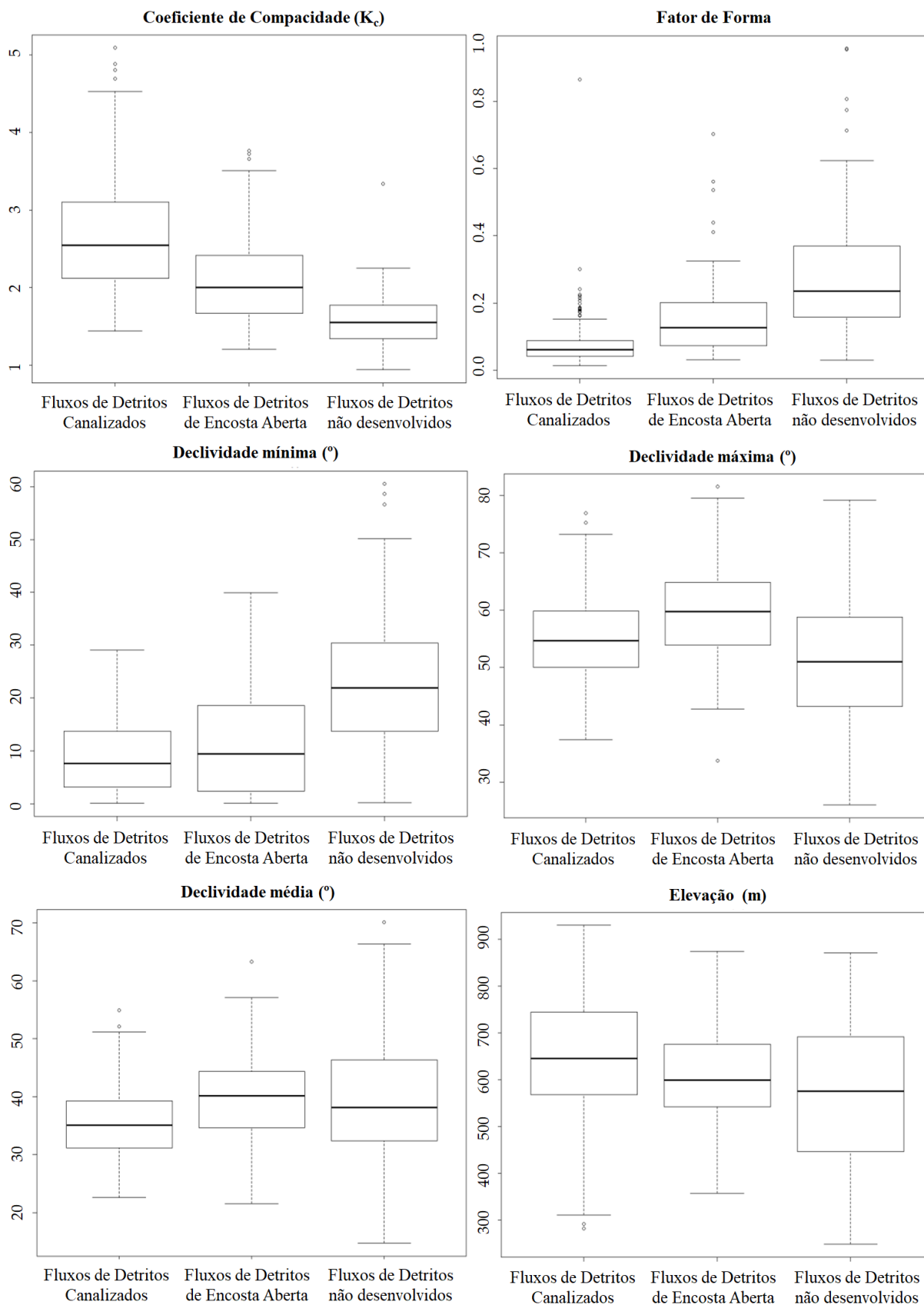
Figura 52. Área a montante média por trecho de cicatriz.

### 6.2.2.2. Caracterização de Fluxos de Detritos Canalizados e de Encosta Aberta

A Tabela 22 apresenta as estatísticas dos principais parâmetros de cada grupo de cicatriz classificado, os fluxos canalizados, os fluxos de encosta aberta e os fluxos não desenvolvidos, representando respectivamente cada *boxplot* da Figura 53. Os parâmetros morfométricos estão representativos do comportamento esperado, especialmente pelos valores de largura e área relativamente maiores nos fluxos de encosta aberta, enquanto que os fluxos canalizados apresentam os maiores comprimentos, justamente por adentrarem no canal de drenagem.







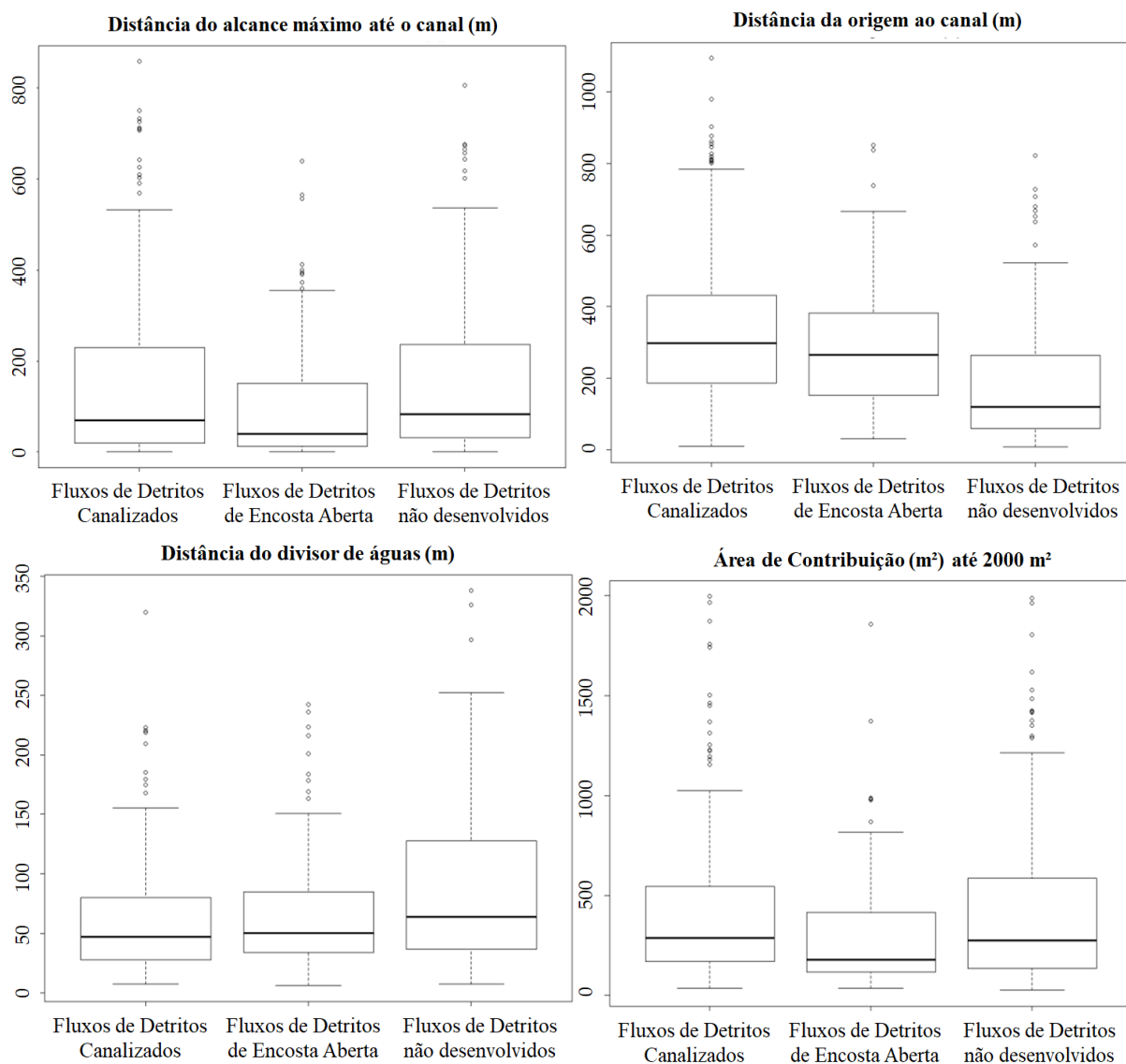


Figura 53. *Boxplot* dos parâmetros para cada tipo de fluxo de detritos.

Embora o perímetro das cicatrizes seja comparativamente maior para os fluxos de detritos canalizados, os valores são bem semelhantes com os de encosta aberta, justamente por essa compensação entre maiores comprimentos e fluxos mais largos, respectivamente. Já os fluxos não desenvolvidos apresentaram valores bastante reduzidos, com comprimentos variando de 7 a 60 metros. Embora o comprimento mínimo seja considerado insuficiente para o desenvolvimento de um fluxo, essas cicatrizes de tamanho reduzido, em sua maioria, fazem parte de fluxos múltiplos, contribuindo no alcance do fluxo de maior ordem consecutiva.

Tabela 22. Parâmetros para cada classe dos tipos de fluxos de detritos.

Classe	Fluxos de Detritos de Encosta Aberta			Fluxos de Detritos Canalizados			Fluxos de Detritos não Desenvolvidos		
	média	mín	máx	média	mín	máx	média	mín	máx
Largura(m)	22.4	4.0	98.9	11.7	2.9	77.2	10.5	2.2	33.0
Área Total (m <sup>2</sup> )	4121.7	301.7	22454.8	2315.2	300	15939.4	350	19.8	1809.8
Comprimento (m)	166.4	60.1	495.7	195.2	62.3	727.8	36.1	7.2	59.8
Perímetro (m)	425.8	136.5	1373.1	439.5	141.9	1518.4	96.7	24.9	199.8
Declividade	40°	11°	81°	36°	9°	76°	39°	22°	79°
Elevação (m)	607	356	875	649	282	930	568	248	872
Ângulo de Alcance	40°	9°	66°	35°	4°	54°	34°	6°	60°
Distância da Cabeceira (m)	67	6	242	61	8	320	89	1	338
Distância da origem ao rio (m)	295	31	851	344	9	1094	184	3	822
Distância do final da cicatriz ao rio (m)	107	0	640	149	0	860	153	0	806
Área de Contribuição (m <sup>2</sup> )	1257	36	86996	7730	36	1322029	19441	25	909358
Kc	2.10	1.20	3.76	2.67	1.43	5.09	1.56	0.94	2.25
FF	0.15	0.03	0.70	0.08	0.01	0.86	0.28	0.09	0.96
-	<b>Maioria</b>			<b>Maioria</b>			<b>Maioria</b>		
Curvatura Perfil	Côncavo			Côncavo			Côncavo		
Curvatura Plano	Convergente			Convergente			Convergente		
Classificação Strahler (MDT)	7			6			4		

A hierarquia das cicatrizes aponta mais de 60% dos fluxos de segunda e terceira ordem como fluxos de detritos canalizados, comprovando a tendência de fluxos de detritos de encosta aberta como fluxos de detritos individuais. A ocorrência de fluxos de detritos múltiplos é frequentemente associada a encostas de maior concavidade, com áreas de iniciação sobre *hollows*, que logo convergem em uma mesma vertente, com maior grau de confinamento, facilmente dando origem a fluxos de detritos de maior ordem.

O fator de forma dos fluxos de encosta aberta apresentaram valores de média, mínimo e máximo muito similares da literatura, embora os fluxos canalizados não tenham apresentado o comportamento descrito por Chen et al. (2009). De fato, por representarem cicatrizes mais alongadas e sem desenvolvimento completo das zonas de deposição em função da permanência das condições de confinamento, os coeficientes de fator de forma dos fluxos canalizados são consideravelmente menores. Da mesma forma, os coeficientes de compacidade seguem a mesma tendência, onde os fluxos não desenvolvidos apresentam valores mais aproximados de 1, indicando um formato mais arredondado, em função dos menores comprimentos, enquanto que os fluxos canalizados apresentam os maiores valores por apresentar geometrias longas e mais estreitas.

Além de menor coeficiente de compacidade e maior fator de forma em relação aos fluxos canalizados, a área e, portanto o volume de material mobilizado também é maior nos fluxos de encosta aberta. Novamente fazendo relação à caracterização de bacias hidrográficas, considerando um maior aporte de material de maneira abrupta, fluxos de detritos de encosta aberta representam um maior potencial de ocasionar bloqueio do vale. Ademais, a sua ocorrência em encostas sem confinamento, possibilita a entrada do fluxo em canais de drenagem de maneira transversal, contribuindo para a interrupção e bloqueio de passagem do fluxo.

Os parâmetros geomorfológicos de declividade, elevação e as distâncias na bacia hidrográfica, não apresentam diferenças significativas que permitam associar a características do fluxo. Já a área de contribuição indica valores com até duas ordens de grandeza a mais para os fluxos canalizados. No entanto, a classificação quanto a ordem de Strahler pelo MDT aponta os fluxos de encosta aberta atingindo canais de ordem 7, enquanto que os canalizados, canais de ordem 6. A definição da maior ordem de drenagem na cicatriz considera que o canal transpassa os limites da cicatriz em qualquer trecho, sem necessariamente coincidir com seu direcionamento.

A área de contribuição é estimada a partir do primeiro trecho de propagação do fluxo, na origem do movimento. Por conseguinte, os fluxos de detritos canalizados já iniciam em áreas de convergência com maior contribuição. Por sua vez, os valores de declividade dos fluxos de encosta aberta são ligeiramente acima das outras classes.

A relação entre esses dois parâmetros, área de contribuição e declividade, é apresentada na Figura 54, no entanto, não foi possível identificar um limiar de separação entre fluxos canalizados e de encosta aberta. Ainda assim, existe uma tendência dos pontos referente às cicatrizes canalizadas em apresentar maiores áreas de contribuição e menores declividades. Já os fluxos de detritos não desenvolvidos, embora apresentem alguns pontos de maior área de contribuição, tem uma tendência de concentração em valores mais baixos, abrangendo toda a faixa de declividades. Por sua vez, os fluxos de detritos de encosta aberta apresentam uma relação de ocorrência em maiores declividades e com menor área de contribuição, considerando a compensação entre as duas variáveis para a deflagração do movimento.

As distâncias do final da delimitação da cicatriz até o canal apontam valores maiores para os fluxos canalizados. Essa condição é decorrente da definição do limiar para início da drenagem nas análises, na ordem 9 da classificação de Strahler. Por conseguinte, enquanto que os fluxos de detritos canalizados percorrem inicialmente canais de drenagem de menor ordem, os fluxos de detritos de encosta aberta, em bacias com vales confinados, iniciam nas encostas logo às margens do canal, e percorrem a vertente de grande declividade até atingir o canal ou cessar em pontos de proximidade.

Essa condição de bacia bem encaixada também reflete na definição do ângulo de alcance desses fluxos, resultando em valores bem superiores aos valores frequentemente associados a fluxos de detritos. Ainda assim, é possível identificar uma tendência dos fluxos canalizados em apresentar valores ligeiramente inferiores aos fluxos de encosta aberta. A Figura 55 apresenta a distribuição dos ângulos de alcance de cada cicatriz.

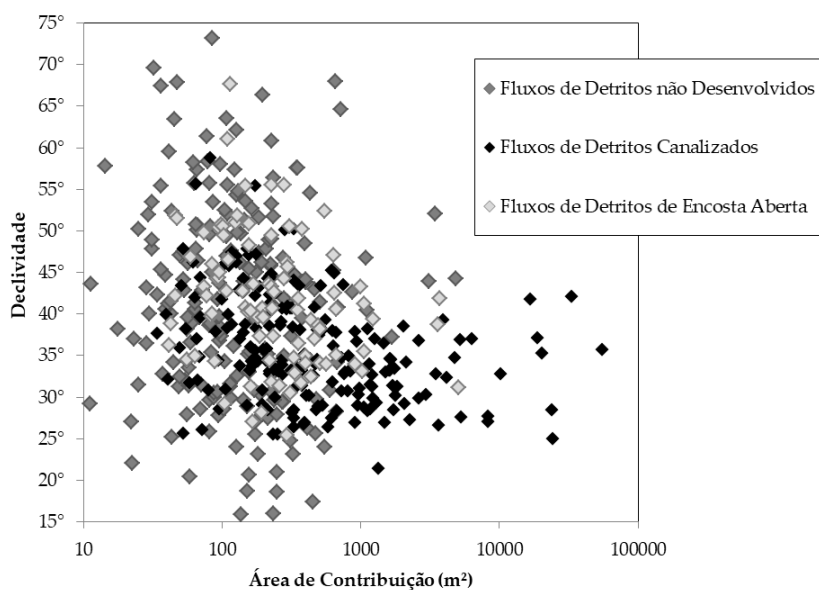


Figura 54. Distribuição da área de contribuição e declividade dos trechos de cicatriz.

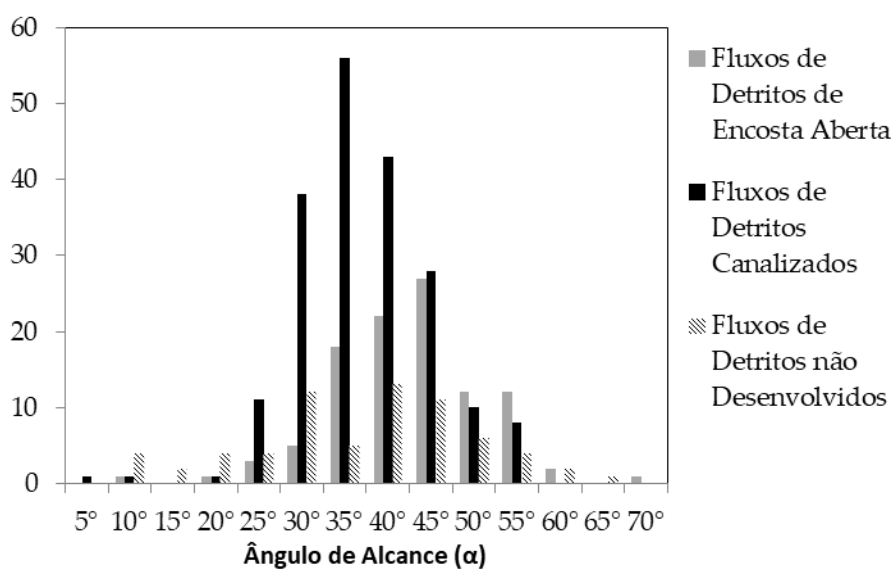


Figura 55. Distribuição do ângulo de alcance de cada cicatriz.

### 6.3. Relações Empíricas

Embora a classificação dos tipos de fluxos de detritos tenha sido feita com base nas relações de comprimento e largura do fluxo, entre as cicatrizes há uma grande variação nas dimensões desses valores. As relações geradas para cada cicatriz, individualmente, apresentaram altos coeficientes de correlação, próximos de 1. No entanto, a correlação considerando todos os trechos de cada classificação, mesmo para os fluxos de encosta aberta, obteve menores valores de correlação (Figura 56).

Todavia, a relação do comprimento com a área afetada a montante pelo fluxo resultou em coeficientes de correlação de 0.82 e 0.83 respectivamente para fluxos de detritos canalizados e de encosta aberta (Figura 57). Contudo, a taxa de ampliação da área afetada para fluxos de detritos de encosta aberta é consideravelmente maior do que para os fluxos canalizados. A equação ajustada para os fluxos de encosta aberta apresenta um expoente de 1.5, enquanto que para fluxos canalizados o expoente da equação é muito próximo de 1.0, sugerindo uma relação quase linear.

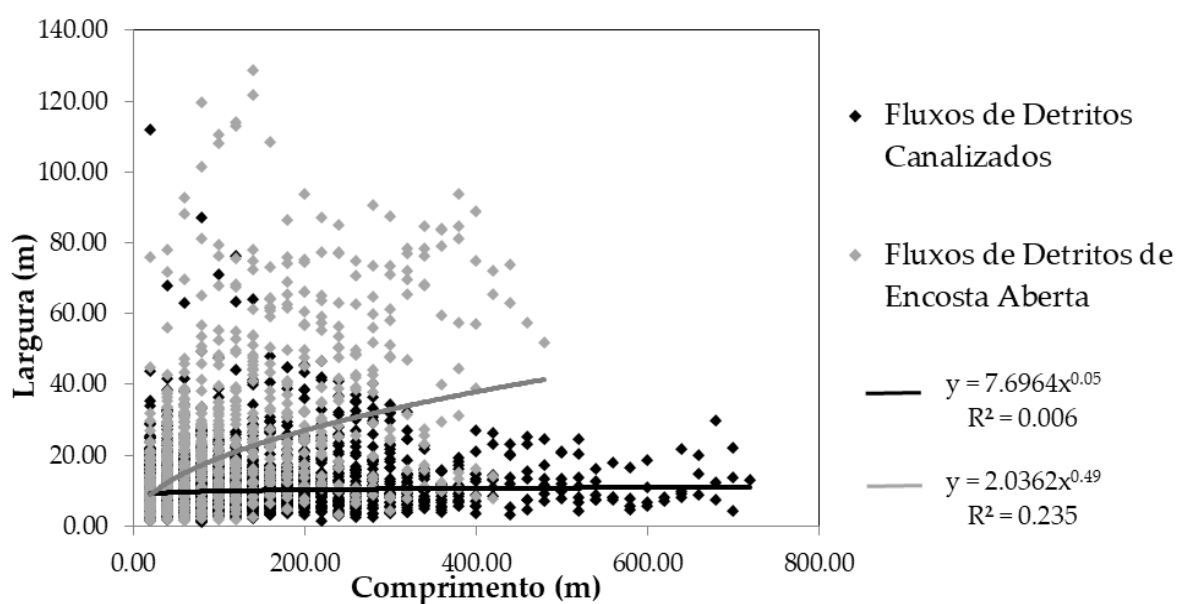


Figura 56. Correlação entre comprimento e largura do fluxo.

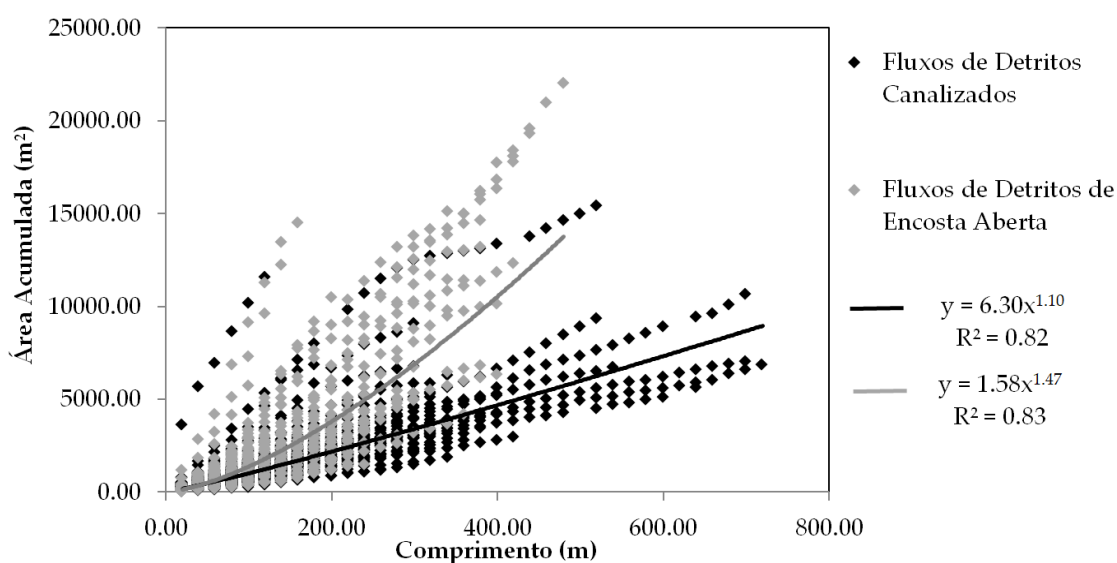


Figura 57. Correlação entre comprimento e área a montante de cada trecho da cicatriz

Analogamente às relações geomorfológicas que consideram área de contribuição com a largura e a profundidade do rio (MEJIA e REED, 2011; PAIVA et al. 2011; LEOPOLD e MADDOCK, 1953), foi estimada uma relação empírica que descreve a largura como função da área afetada pelo fluxo. Essa equação descreve dois cenários independentes, uma ampliação gradual da largura dos fluxos de encosta aberta, e a zona de deposição dos fluxos de detritos canalizados completamente desenvolvidos, quando alcançam uma perda de confinamento. Como os fluxos de detritos canalizados foram considerados parcialmente desenvolvidos, a correlação sugerida apresenta uma boa correlação apenas para os fluxos de detritos de encosta aberta (Figura 58).

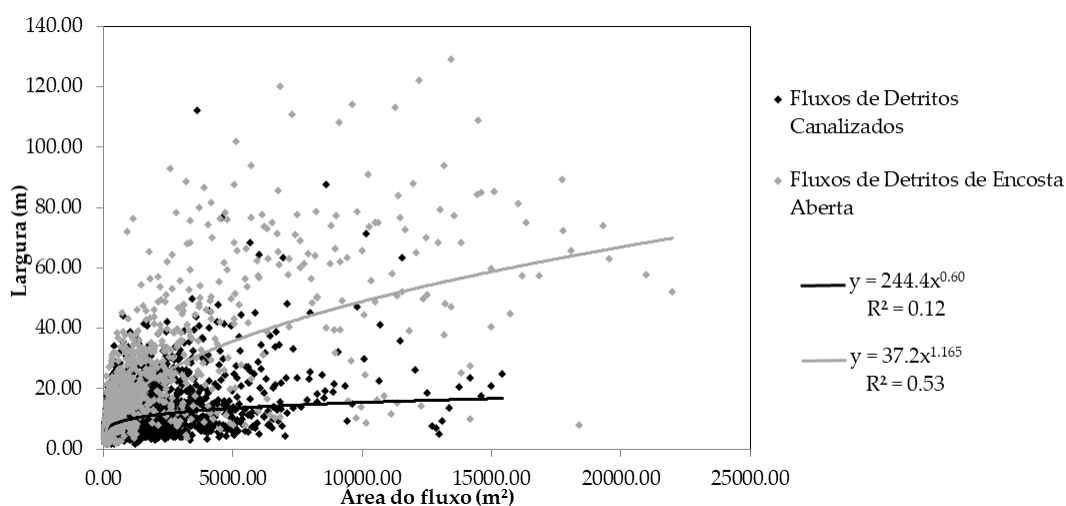


Figura 58. Correlação entre área e largura do fluxo.

Considerando as equações empíricas já propostas na literatura (Tabela 5) foi estimado o volume associado aos fluxos de detritos em função da área afetada (Figura 59). Segundo a equação média das diferentes equações apresentadas na Tabela 5 o evento ocorrido na bacia do rio Mascarada gerou um volume de aproximadamente 3,5 milhões de m<sup>3</sup>. O volume estimado de cada cicatriz foi relacionado com o alcance máximo do fluxo, para cada tipo de classe (Figura 60). Apesar de próximas existe uma separação de tendência entre as classes, principalmente quanto aos fluxos não desenvolvidos, associados a volumes menores. Por sua vez, os fluxos canalizados indicam maiores alcances, e volumes muito similares à faixa de valores para os fluxos de encosta aberta. No entanto, o maior incremento de vazão líquida nos fluxos canalizados pode resultar em volumes



consideravelmente maiores, de forma que equações entre área e volume deveriam discriminar ao menos os tipos de fluxo, e considerar o tipo de material envolvido.

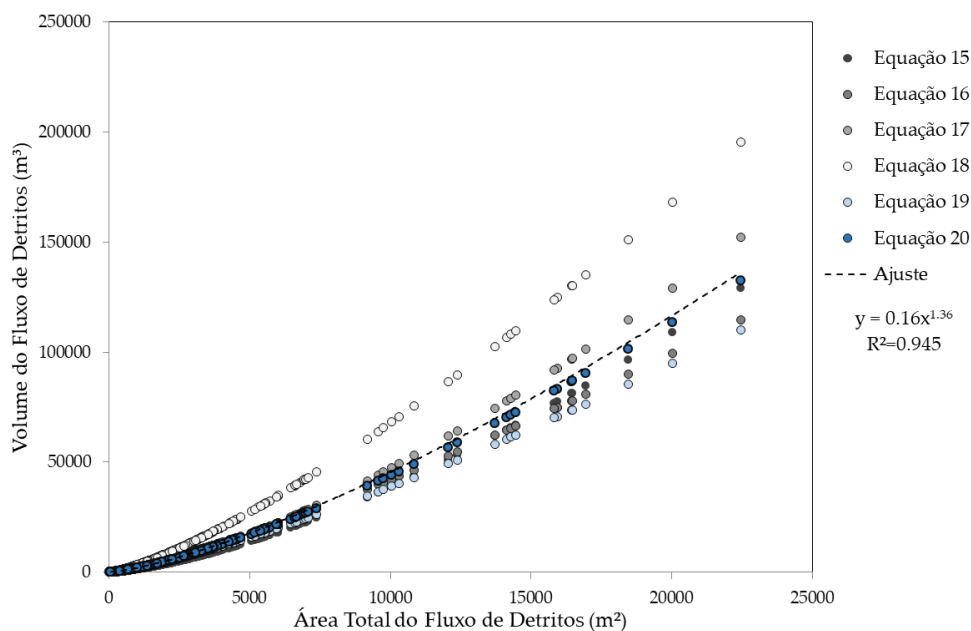


Figura 59. Relações entre área do fluxo e volume, conforme equações da literatura.

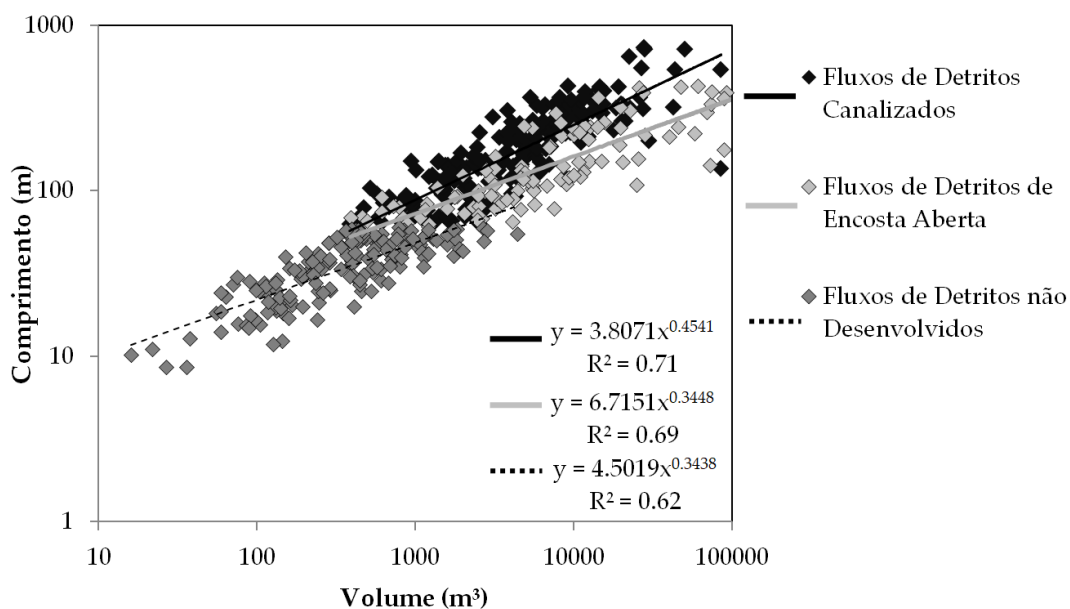


Figura 60. Correlação entre o volume estimado e comprimento do fluxo.

## 6.4. Modelo Empírico com Geoprocessamento

### 6.4.1. Fluxo de Detritos de Encosta Aberta

A utilização do modelo proposto para a encosta com os fluxos de detritos de encosta aberta requer a definição apenas do limiar de proporção e do ângulo de alcance, uma vez que não tendo ocorrido o confinamento do fluxo durante a simulação, o resultado é gerado ao final da primeira etapa. Os parâmetros de entrada foram definidos em 0.37 para o limiar de proporção e  $9^\circ$  para o ângulo de alcance de, obtido como valor mínimo para os fluxos de detritos de encosta aberta a fim de abranger o cenário de maior alcance entre as cicatrizes ocorridas na bacia. A simulação resultou em 73% de Índice de acerto, e 14% de índice de erro (Figura 61).

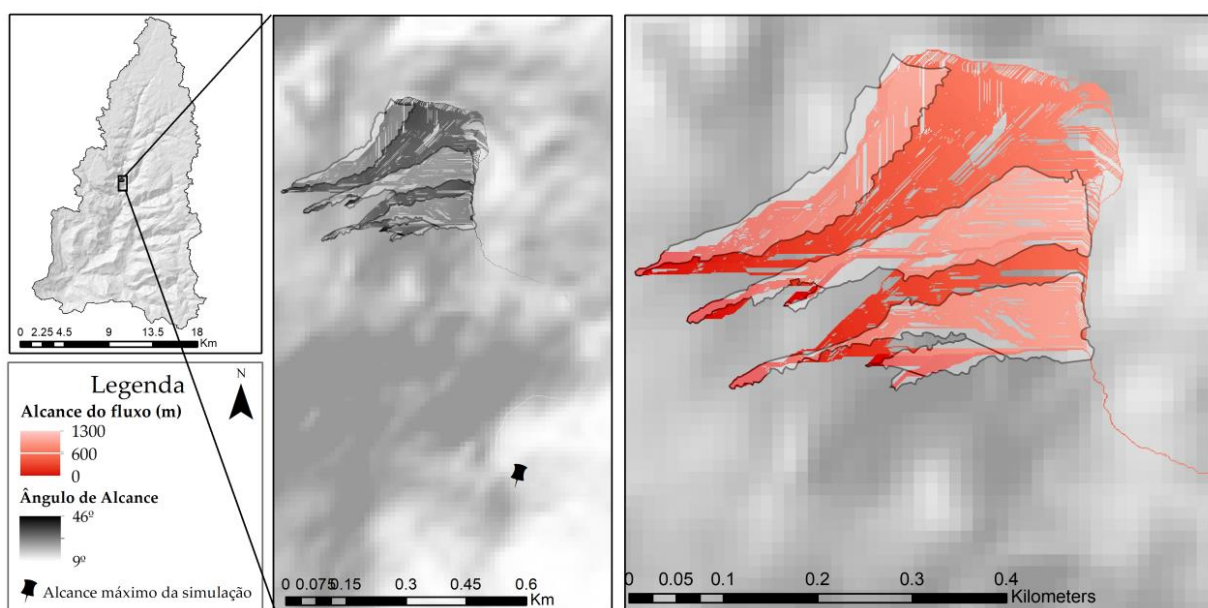


Figura 61. Simulação para os fluxos de detritos de encosta aberta.

A principal limitação é decorrente do alcance do fluxo percorrendo o canal até atingir o ângulo de  $9^\circ$ , resultando em 1.3 km de distância do fluxo. No entanto, essa condição de deposição da maior parte de material do fluxo sobre a encosta e transporte de material pelo canal, é bastante provável. Segundo relatos do evento ocorrido na bacia do rio Mascarada, no município de Rolante, cerca de alguns quilômetros a jusante, foi observado um fluxo fortemente carregado com detritos, resultante da junção de diversos fluxos no canal. Contudo, não é possível discernir a fonte específica desse material, ou as áreas de maior contribuição. Certamente, todos os fluxos que atingiram o canal de drenagem, mesmo que tenham cessado a propagação logo em seguida, contribuíram com uma grande carga de sedimentos e detritos. Por conseguinte, embora o alcance da simulação tenha ultrapassado os

limites de delimitação da cicatriz, a propagação de material introduzido no canal pelo fluxo de detritos possivelmente atingiu esse alcance.

#### 6.4.2. Fluxo de Detritos Múltiplo Canalizado

A simulação do fluxo de detritos múltiplo canalizados, tendo ocorrido o confinamento do fluxo no canal de drenagem, é resultante da aplicação das duas etapas do modelo. Inicialmente a propagação a partir da origem foi simulada com *Avalanche Runout*, considerando um limiar de proporção de 0.37 e um ângulo de alcance de 4°, identificado na caracterização como valor mínimo para os fluxos canalizados. A partir do trecho de confinamento do fluxo no canal, coincidindo com a cicatriz de maior ordem, o modelo passa a considerar a simulação pela *Distance Down*. A profundidade do fluxo foi obtida pela equação de calibração proposta, com a definição do parâmetro de calibração ( $\phi$ ) a partir das equações da literatura e com a largura média dos fluxos de detritos canalizados. A declividade do canal na encosta é bastante elevada, o que resultou em uma altura de profundidade do fluxo de aproximadamente 5 metros (Tabela 23).

Tabela 23. Dados de entrada para obtenção da profundidade do fluxo (h).

Volume (m <sup>3</sup> )	38402
Declividade (m/m)	0.3
Largura (m)	11.7
$\phi$	0.009
h(m)	5

As etapas I e II são apresentadas individualmente na Figura 62 sobre a área da cicatriz mapeada. Na cicatriz do fluxo de primeira ordem é possível observar o confinamento sobre o canal de drenagem, onde a *Avalanche Runout* já não é mais capaz de representar o espalhamento lateral do fluxo. Essa região com baixo desempenho da ferramenta é compensada pela etapa II, sendo o modelo final representado pela junção dessas duas áreas afetadas apresentado na Figura 63.

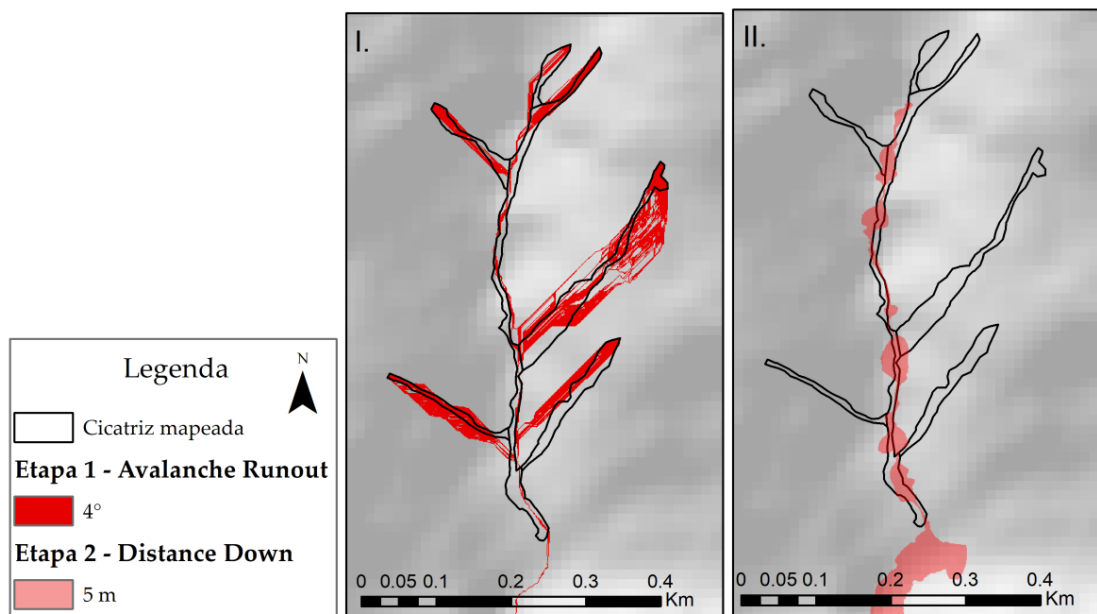


Figura 62. Etapas do modelo. I. Avalanche Runout. II. Distance Down.

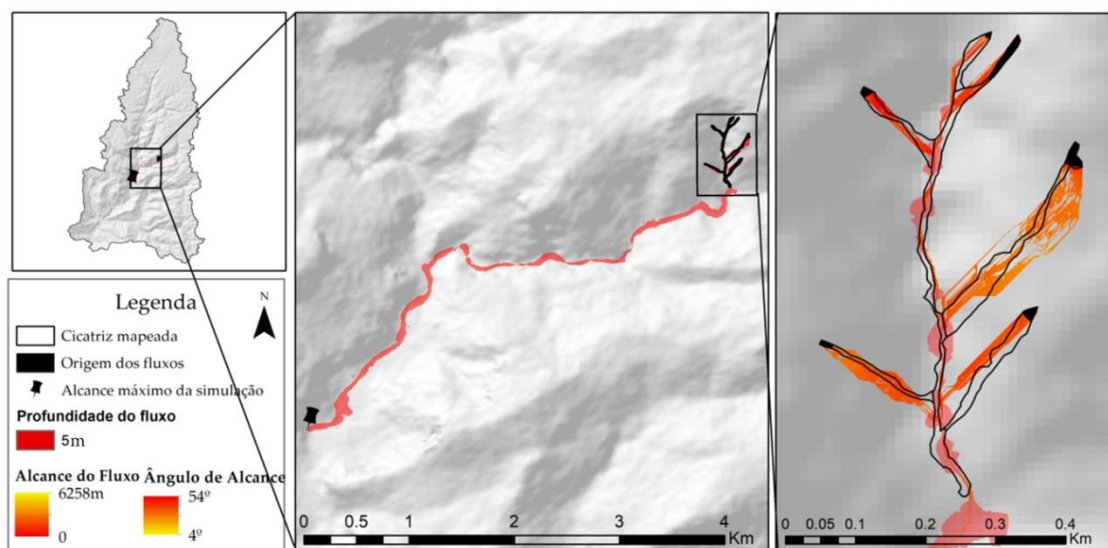


Figura 63. Simulação para os fluxos de detritos canalizados.

A Tabela 24 apresenta os índices de acerto e de erro para cada simulação, sendo que a etapa II corresponde a um aumento de 14% da porcentagem total de acerto do modelo empírico proposto, resultando em 58% de índice de acerto do modelo. O índice de erro considera apenas a propagação sobre a subbacia de ocorrência da cicatriz do fluxo, levando em consideração que a propagação do fluxo sobre o canal não tenha sido inteiramente mapeada, uma vez que estaria incorporando uma área afetada resultante de um conjunto de fluxos de detritos a montante. Por conseguinte, o índice de erro associado ao modelo é de 23%, decorrente na sua maior parte da etapa I de propagação do modelo, especialmente pelo deslocamento de propagação do fluxo de uma das cicatrizes. O índice

de erro, se considerada toda a propagação além da subbacia de ocorrência da cicatriz do fluxo, passa a ser cerca de 300%.

Tabela 24. Índices de acerto e de erro para cada etapa do modelo.

	IA	IE
Etapa I	44.4%	17.8%
Etapa II	18.6%	5.1%
Modelo empírico	58.3%	22.9%

A redução no índice de acerto, em comparação às cicatrizes do fluxo de encosta aberta, pode derivar de limitações do próprio MDT, e pela cicatriz ser relativamente mais estreita que os fluxos de encosta aberta simulados. Por conseguinte, algumas oscilações de direcionamento no percurso simulado reduziram consideravelmente o índice de acerto da simulação. O alcance máximo do fluxo de detritos em função do ângulo mínimo identificado para a classe dos canalizados, também resultou em uma prolongação excessiva além da delimitação da cicatriz mapeada, alcançando mais de 6 km de propagação pelo canal de drenagem.

Analogamente ao fluxo de encosta aberta, embora o fluxo de detritos tenha apresentado maior acúmulo de material ao final da delimitação da cicatriz, impulsionado pelo incremento de vazão líquida e por outros fluxos de detritos a montante, possivelmente atingiu esse percurso, mesmo que como uma inundação brusca ou um fluxo hiperconcentrado. No entanto, quando analisamos um conjunto de fluxos de detritos ocorridos em um evento, e não um único fluxo de detritos, a diferenciação da contribuição de cada fluxo em uma determinada zona de passagem em trechos mais a jusante é muito difícil de ser determinada. Além das incertezas quanto ao volume de material deslocado e constantemente incorporado ao movimento por processos de erosão do leito, áreas de deposição e obstrução do fluxo geram inúmeras discontinuidades. Dessa forma, a identificação e quantificação de graus de conectividade entre zonas de iniciação e áreas de passagem do fluxo podem auxiliar na definição do real alcance do movimento. Em suma, pode-se considerar que o fluxo de detritos tenha atingido esse alcance, embora não se tenha quantificado em quanto de volume ou concentração de sedimentos e detritos tenha contribuído.

### 6.4.3. Fluxos de Detritos Individuais Canalizados

A simulação dos fluxos de detritos individuais canalizados foi feita com a calibração dos parâmetros para cada cicatriz. No entanto, pela proximidade de ocorrência, em função de similaridades de morfologia da encosta, e da própria composição do fluxo os parâmetros calibrados foram bem similares (Tabela 25). O ângulo de alcance considerado foi vem acima do valor mínimo estipulado para os fluxos de detritos canalizados. Contudo, devido a metodologia de mapeamento adotada, agregado a elevada declividade das encostas, a simulação foi propagada até atingir a delimitação da cicatriz mapeada, sem propagação pelo canal de drenagem. A Figura 64 apresenta as áreas simuladas em cada fluxo, em conjunto com a simulação realizada pelo modelo de Paul (2020).

Tabela 25. Parâmetros utilizados em cada fluxo.

	Ângulo de Alcance	Limiar de proporção
F1	24°	0.37
F2	24°	0.2
F3	34°	0.2
F4	34°	0.2

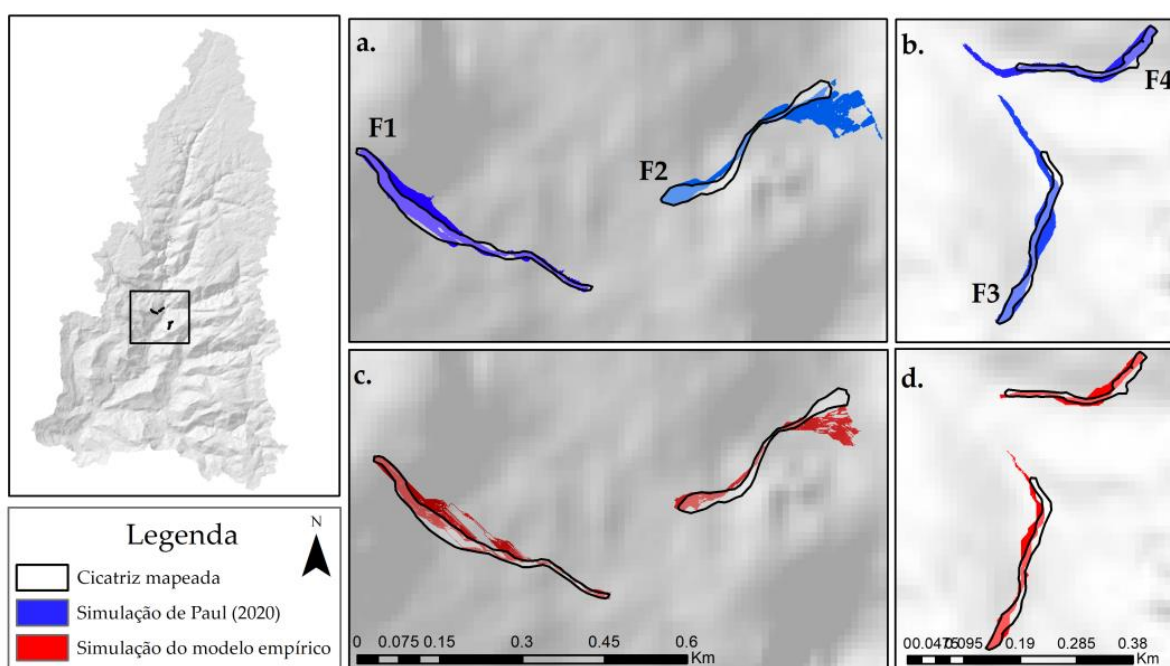


Figura 64. Simulação e comparação do modelo proposto e modelo de Paul (2020).

A Tabela 26 apresenta os índices de acerto e de erro obtidos na simulação de cada fluxo, tanto para o modelo de Paul (2020), quanto para o modelo empírico proposto. Embora o comportamento da propagação dos fluxos tenha sido bastante similar, os índices de acerto do modelo de Paul (2020) foram consideravelmente maiores, de em média 27%. Todavia, os índices de erro também foram maiores, em média 8%. Ao analisarmos a relações entre IA/IE é possível constatar que em três dos fluxos analisados o modelo empírico apresenta valores maiores, e, portanto, melhor desempenho segundo a métrica adotada.

Tabela 26. Índices de Acerto e de erro para o modelo proposto e modelo de Paul (2020).

	Modelo fisicamente embasado (Paul, 2020)			Modelo empírico		
	IA	IE	IA/IE	IA	IE	IA/IE
F1	83.29%	9.31%	8.95	48.67%	10.17%	4.79
F2	57.86%	27.77%	<b>2.08</b>	34.23%	13.32%	<b>2.57</b>
F3	79.98%	17.49%	<b>4.57</b>	57.21%	8.29%	<b>6.90</b>
F4	87.94%	17.40%	<b>5.05</b>	60.07%	9.02%	<b>6.66</b>

A principal diferenciação entre os resultados ocorre pela restrição do espalhamento do fluxo com o modelo empírico, em decorrência do método de infinitas direções de fluxo, independente do limiar de proporção, o fluxo é direcionado para até duas células que apresentam o maior desnível negativo, gerando uma descontinuação na área afetada pela convergência do escoamento em algumas direções específicas. Essa condição foi a principal responsável pela redução dos índices de acerto no modelo, da mesma forma, pela redução dos índices de erro.

Os dois modelos apresentam abordagens simplificadas, embora o modelo de Paul (2020) já incorpore um maior nível de complexidade considerando as equações de propagação em função da reologia do fluxo de detritos. Destaca-se como principal vantagem frente ao modelo fisicamente embasado o tempo de processamento da simulação e a simplicidade conceitual do modelo empírico, apresentando resultados muito similares e até mesmo melhores quando avaliado o desempenho da simulação pela relação de IA/IE.

#### 6.4.4. Fluxos de Detritos na Bacia do Rio Mascarada

A aplicação do modelo em toda a bacia foi feita a partir das áreas de origem definidas em cada cicatriz como a área atingida em até 10% do comprimento total da mesma, partindo do ponto de maior elevação. A simulação apresentada pela Figura 65 resultou em um índice de acerto de 46%, indicando que o modelo apontou como área suscetível quase 50% da área afetada pelos fluxos de detritos no evento. O índice de erro foi cerca de 20% na primeira etapa do modelo e subiu para 55% na segunda etapa. De fato a delimitação da área afetada sobre o canal principal considerando uma profundidade de 5 metros do fluxo de detritos, conforme obtido na calibração do fluxo múltiplo (item ii), é considerada superestimada, especialmente ao longo de todo o canal de drenagem até o exutório da bacia. No entanto, a delimitação das cicatrizes dos fluxos de detritos não considerou as zonas de passagem do fluxo ao longo do canal de drenagem, onde além das contribuições de material do fluxo a montante, a vazão líquida também se encontrava bastante elevada durante o evento.

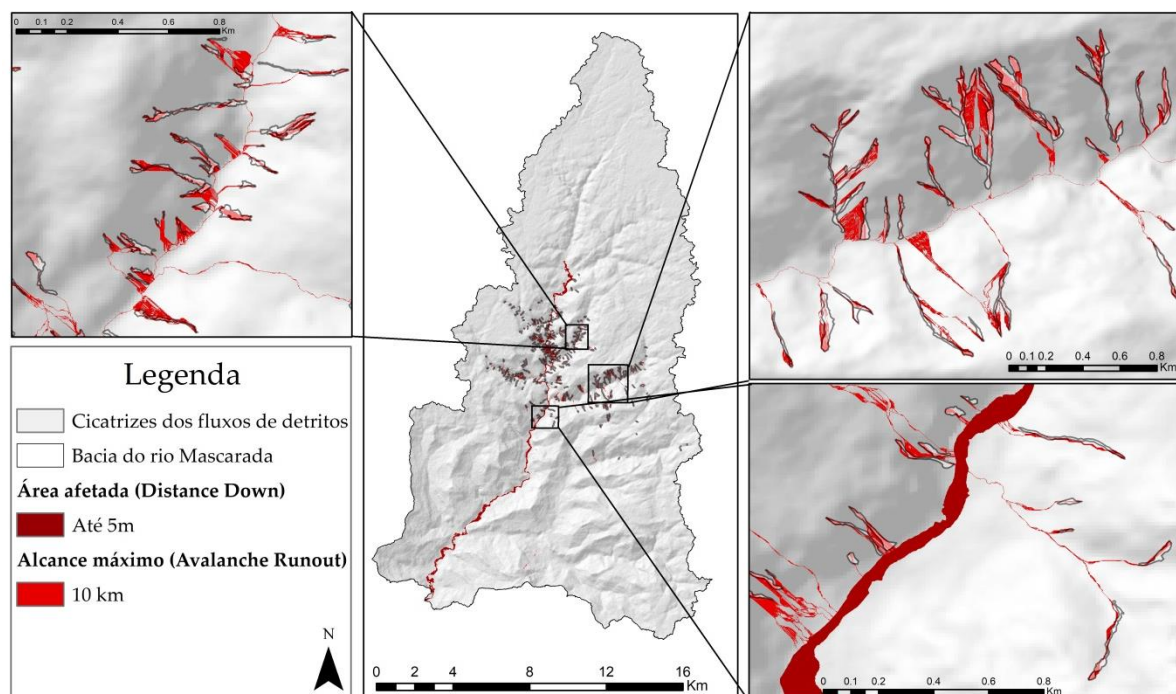


Figura 65. Aplicação do modelo empírico em toda a bacia do rio Mascarada.

A propagação do fluxo na simulação é fortemente condicionada pela área de origem, enquanto que o espalhamento e o alcance são influenciados pelo limiar de



proporção e o ângulo de alcance. No entanto, a alteração desses dois parâmetros, considerando o desempenho médio em toda a área de simulação, não reflete melhorias significativas nos resultados. Portanto, a sensibilidade do modelo é vinculada não apenas aos parâmetros de entrada, mas também em função da delimitação da área de origem, da própria morfologia da encosta e das limitações do modelo decorrentes do método de infinitas direções de fluxo. Em alguns trechos o fluxo acaba convergindo para um único pixel, e posteriormente pode voltar a dispersar entre as células. No entanto, essa condição acaba criando ilhas que comprometem o desempenho do modelo, reduzindo o índice de acerto da simulação.

A utilização do menor ângulo de alcance obtido na caracterização (4º) refletiu na maior parte das cicatrizes atingindo o canal de drenagem. No mapa do índice de conectividade hidrossedimentológica para o evento que desencadeou esses fluxos de detritos, apresentado por Zanandrea et al. (2021), de fato a região com maior incidência de cicatrizes apresenta maior conectividade com o exutório da bacia. Ainda assim, algumas áreas são descritas como zonas de deposição de material do fluxo de detritos, que por sua vez não estaria conectada ao exutório. Conforme apresentado pelos autores, nas áreas de menor conectividade foi identificada a presença de sedimentos de maior granulometria e troncos de árvore, indicando uma área de deposição dos fluxos.

Muitos fluxos de detritos que atingiram o canal acabaram incorporando grande quantidade de material mobilizado, entre blocos, sedimentos e detritos lenhosos que seguiram transportados por maiores distâncias. Parte desse material foi carregado até próximo do exutório da bacia, caracterizando maior alcance do movimento (Figura 66). Embora a área no entorno do canal de drenagem tenha sido apontada como área suscetível, mesmo não sendo delimitada pelo inventário, ela acabou sendo fortemente afetada pelo evento. Contudo, o alcance do material mobilizado foi decorrente não apenas de um único fluxo de detritos, mas de centenas de fluxos de detritos a montante, em conjunto com vazões extremas no canal de drenagem.



Figura 66. Rio Mascarada após o desastre de 2017. (Imagem cedida pelo Corpo de bombeiros de Rolante).

## 6.5. Desafios, Limitações e Incertezas

A partir da metodologia proposta, desde a i) caracterização, ii) classificação, e o iii) modelo empírico para análise de suscetibilidade, são levantadas algumas incertezas e limitações incorporadas aos resultados.

- i) **Caracterização:** A principal limitação frente aos parâmetros morfométricos é decorrente das delimitações das áreas de jusante da cicatriz, onde não foi possível discernir com precisão o limite de alcance do fluxo, especialmente dos fluxos canalizados. Em áreas florestadas o mapeamento de cicatrizes apenas por sensoriamento remoto pode ser insuficiente, embora ainda seja o método mais eficaz para abranger grandes áreas.

Para os parâmetros geomorfológicos a utilização do MDT obtido posteriormente a ocorrência do evento representa a maior limitação e incerteza dos resultados. Destaca-se as análises de curvatura da cicatriz resultando em sua maioria como côncavas-convergentes, enquanto que muitos registros indicam a predominância dos fluxos de detritos sobre curvaturas planas, especialmente para os fluxos de encosta aberta.

- ii) Classificação: A classificação proposta para hierarquia das cicatrizes de fluxos de detritos múltiplos considera especialmente o comprimento da cicatriz, enquanto que características como o volume do fluxo em decorrência da área de contribuição podem representar maior influência na incorporação e propagação do movimento.
- iii) Modelo de análise de suscetibilidade: Além das incertezas decorrentes da própria metodologia empírica, a ausência de calibração da profundidade do fluxo para a equação proposta bem como as incertezas no reconhecimento do real alcance máximo do fluxo, podem ter resultado em uma superestimativa da área afetada considerando a simulação em toda a bacia, pelo elevado valor do IE. Todavia, conforme discutido, o evento acabou de fato atingindo essa área no entorno do canal, mesmo que por efeito concomitante de outro agente mobilizador além do próprio fluxo. Nesse sentido, levar em conta a precipitação envolvida na deflagração do movimento pode inferir sobre a área afetada e no alcance do fluxo, podendo ser indiretamente representada no parâmetro de profundidade.

Não obstante a propagação dos fluxos de detritos por canais de drenagem é bastante recorrente na forma de inundações de detritos, caracterizadas pela elevada concentração de sedimentos e aumento da vazão no canal, a identificação desses limiares de transformação do movimento é difícil de ser estabelecida, especialmente por imagens aéreas. Por conseguinte, uma abordagem empírica de separação do movimento em função do principal agente mobilizador pode ser uma alternativa. Um fluxo de detritos como movimento de massa sendo deflagrado na encosta apresenta como principal agente mobilizador a própria gravidade. Por sua vez, ao atingir o canal de drenagem, mesmo com uma perda de declividade, a elevada vazão acaba assumindo a propagação do movimento. Essa segmentação do movimento pode auxiliar na delimitação das cicatrizes e no levantamento de inventários padronizados, garantindo maior representatividade e credibilidade em caracterizações e classificações dos movimentos.

## 7. RECOMENDAÇÕES

A aplicação do modelo é feita de maneira manual, sendo sugerida a junção das duas ferramentas em um único algoritmo de aplicação, considerando como critério para prosseguir para a etapa II a canalização do fluxo em um único pixel. Ademais, para propagação no canal de drenagem pode ser considerada a definição de uma profundidade variável, em função de um volume do fluxo dado pela área de contribuição, que representa o material mobilizado a montante e a precipitação na bacia. Na definição desse incremento de volume pela área de contribuição devem ser consideradas as áreas de conectividade hidrossedimentológica, a fim de que sejam levados em consideração trechos de descontinuidade mesmo em eventos extremos.

Embora as cicatrizes tenham ocorrido sobre áreas de vegetação, tornando a caracterização especificamente referente a fluxos de detritos lenhosos, as diferenças entre mata nativa e floresta plantada podem acarretar em alterações nos padrões dos fluxos, especialmente pela presença de grandes troncos de espécies usadas na silvicultura, mais facilmente barrados por obstáculos no percurso. Além disso, o volume incorporado ao fluxo pode variar consideravelmente em função da cobertura da área mobilizada.

A metodologia de classificação proposta é baseada no comportamento de propagação do fluxo, observada após a sua ocorrência. Recomenda-se a determinação de critérios que permitam identificar a classificação do fluxo de detritos em função da morfologia da encosta, permitindo o reconhecimento prévio do padrão de comportamento do fluxo para análises de suscetibilidade. Análises de curvatura da encosta e do grau de confinamento da vertente podem auxiliar na determinação de um limiar para classificação do tipo de fluxo de detritos com maior propensão de ocorrência.

Por ser um modelo empírico, é essencial a disponibilidade de dados para calibração e validação. A utilização de inventários é ideal para um melhor desempenho do modelo, ressaltando a importância do registro de eventos já ocorridos, independente de ter sucedido em desastre. Para a aplicação do modelo, no caso de regiões sem registro de fluxos de detritos, recomenda-se a utilização dos parâmetros calibrados para regiões de características similares à área de interesse. Além dos parâmetros, é fundamental dispor de um MDT de qualidade, e considerar

um critério de definição das áreas de origem. Com o propósito de gerar um mapa de suscetibilidade a fluxos de detritos é recomendada a utilização de modelos de estabilidade de encosta para definição das áreas de origem e iniciação do fluxo. A aplicação do modelo pode ser feita com a finalidade de estudo preliminar, especialmente em municípios que não dispõe de mapeamentos de suscetibilidade, a fim de auxiliar o embasamento de decisões de planejamento territorial e análises de risco.

## **8. CONCLUSÕES**

A caracterização dos fluxos de detritos lenhosos da bacia do rio Mascarada permitiu identificar padrões de propagação do movimento, usados como base para classificar as cicatrizes mapeadas. Entre os parâmetros morfométricos o comprimento e a largura do fluxo foram considerados os mais representativos das cicatrizes dos fluxos de detritos, especialmente na diferenciação de cada classe de grau de confinamento. Entre os parâmetros geomorfológicos, embora a declividade tenha apresentado variações entre os tipos de fluxo, a curvatura era vista como um dos principais parâmetros para classificação dos tipos de fluxo. Contudo, a falta de representatividade do terreno anterior à ocorrência do evento, resultou em uma forte interferência nos resultados, uma vez que a própria escavação do fluxo acaba gerando uma condição de maior convergência e concavidade na área da cicatriz.

A diferenciação quanto aos fluxos de detritos canalizados e de encosta aberta é pouco utilizada, especialmente em inventários e descrições de eventos, sendo um dos prováveis motivos a ausência de metodologias quantitativas e descritivas de cada uma das classes. A metodologia de classificação dos fluxos de detritos quanto ao grau de confinamento considerando as unidades de encosta não foi considerada adequada para a classificação das cicatrizes na bacia do rio Mascarada. A classificação proposta, no entanto, resultou em uma separação condizente com o comportamento esperado dos fluxos de detritos e observado na bacia.

O modelo empírico para análise de suscetibilidade precisa ser validado especialmente quanto aos parâmetros de calibração para a equação da profundidade. Embora o desempenho do modelo tenha sido satisfatório considerando coeficientes de equações da literatura, a obtenção de relações

empíricas para dados locais, com maior descrição e compatibilização do tipo de fluxo de detritos, pode resultar em maior representatividade dos resultados.

Embora o modelo tenha alcançado uma elevada taxa de índice de acerto de até 73%, o valor mais baixo para as simulações foi de 34%. Ainda assim, o fluxo apresentou um comportamento de propagação muito próximo da cicatriz mapeada. As maiores taxas de IA/IE em comparação ao modelo de Paul (2020) trazem ainda maior destaque às possibilidades de aplicação do modelo. Apesar de simplificado, o modelo proposto permitiu simular as diferentes classificações dos fluxos de detritos, tanto fluxos múltiplos como individuais, e fluxos de encosta aberta e canalizados. A facilidade de aplicação do modelo representa uma forte vantagem principalmente para estudos preliminares e em escala regional, auxiliando a demanda latente de prevenção contra desastres.

## REFERÊNCIAS

ABATTI, B. H. Avaliação da conectividade hidrossedimentológica em uma pequena bacia do Planalto dos Campos Gerais no Rio Grande do Sul. 2021. 150 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Considering the representation of both classes of debris flow, an empirical model was proposed applied from geoprocessing tools, using flow direction algorithms together with three empirical calibration parameters: the angle of reach, the proportion threshold and the depth of debris flow. To define these values, parameters and empirical equations were obtained from literature and from the characterization of scars. The results of the proposed model obtained hit rates of up to 73% and error rates of up to 23%, presenting propagation simulations with results similar to those of a simplified physically based model brought by Paul (2020). The use of the proposed model is recommended especially for a preliminary study, aiming to initially fill this gap in terms of disaster prevention on a national scale.

Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

AFSHARI, S.; TAVAKOLY, A. A.; RAJIB, M. A.; ZHENG, X.; FOLLUM, M. L.; OMRANIAN, E.; FEKETE, B. M. Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 539-556. 2018.

ALEXANDER, D. Urban landslides. **Progress in Physical Geography**, v. 13, p.157-191. 1989.

ALVIOLI, M; MARCHESINI, I; REICHENBACH, P; ROSSI, M; ARDIZZONE, F; FIORUCCI, F; GUZZETTI, F. Automatic delineation of geomorphological slope units with `r.slopeunits v1.0` and their optimization for landslide susceptibility modeling. **Geoscientific Model Development**, [S.L.], v. 9, n. 11, p. 3975-3991, 2016. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-9-3975-2016>

ALVIOLI, M; GUZZETTI, F; MARCHESINI, I. Parameter-free delineation of slope units and terrain subdivision of Italy. **Geomorphology**, v. 358, p. 107124, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107124>.

BARRAGAN, M.L.M.; MICHEL, G.P.; KOBİYAMA, M.; ZAMBRANO, F.C.; BAUMBACH, M.F.; VASCONCELLOS, S.M. Abordagens empíricas utilizadas na modelagem de fluxos de detritos.. In: XXI SBRH, 2015, Brasília. Porto Alegre: ABRH, 2015. p.1-8.

BAGNOLD, R. A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. **Royal Society**. Londres, v. 225, p. 49-63.1954.

BALLANTTYNE, C.K. **Geomorphological changes and trends in Scotland: debris-flows**. Scottish Natural Heritage Commissioned Report. 2004.

BATES R. L.; JACKSON, J. A. Glossary of geology. **American Geological Institute**, Falls Church, Virginia, 788p. 1984.

BATHURST, J. C.; BURTON, A.; WARD, T. J. Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.123 (5), p. 410–419. 1997.

BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS—A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid based regional slope-stability analysis**. USGS open-file report 02–424, 2002.

BEE, E. J.; DASHWOOD, C.; PENNINGTON, C.; CIUREAN, R. L.; LEE, K. Creating a national scale debris flow susceptibility model for Great Britain: a GIS-based heuristic approach, **Natural Hazards Earth System Sciences Discuss.**, <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-54>, 2019.

BEGUERÍA, S.; VAN ASCH, Th.W.J.; MALET, J.-P.; GRONDAHL, S. (2009). A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 9, pp. 1897-1909.

BERTI, M.; SIMONI, A. Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships. **Geomorphology**, v. 90, p. 144-161. 2007.

BERTI, M.; SIMONI, A. DFLOWZ: A free program to evaluate the area potentially inundated by a debris flow. **Computers e Geosciences**, v. 67, p. 14-23. 2014.

BLAHUT, J., VAN WESTEN, C.J., STERLACCHINI, S., 2010. Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. **Geomorphology**, v. 119, 36–51. 2010.

BOGAARD, T; GRECO, R. Invited perspectives: hydrological perspectives on precipitation intensity-duration thresholds for landslide initiation. **Natural Hazards And Earth System Sciences**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 31-39, 4 jan. 2018. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-18-31-2018>.

BOVIS, M. J.; JACOB, M. The role of debris supply to determine debris flow activity. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 24, p. 1039– 1054. 1999.

BREITFUSS, G.; SCHEIDEGGER, A. On a possible mechanism of Alpine debris flows. **Annals of Geophysics**, v. 27, n. 1–2, p. 45–57, 1974. Disponível em:



BRASIL. **Lei nº 12.608**, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Diário Oficial da União. Brasília, DF, v. 01, n. 547, 2011.

CARDOZO, G. L.; ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M. Parâmetros geomorfológicos para avaliação pós-desastre de escorregamentos: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Mascarada/RS. em **Anais do I Encontro Nacional de Desastres**, Porto Alegre, Jul. 2018, 1, 8 p.

CAREY, J. M.; COSGROVE, B.; NORTON, K.; MASSEY, C. I.; PETLEY, D. N.; LYNDSELL, B.. Debris flow-slide initiation mechanisms in fill slopes, Wellington, New Zealand. *Landslides*, [S.L.], p. 1-12, 2021. Springer Science and Business Media LLC.

CARDOZO, G.L.; ZANANDREA, F.; MICHEL, G.P.; KOBIYAMA, M. Inventário de movimentos de massa na bacia hidrográfica do rio Mascarada/RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 43, e31, p. 1-26, 2021.

CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Brasil**. Santa Catarina CEPED/UFSC, 2012, p. 94.

CHEN, Jinn-Chyi; LIN, Ching-Weei; WANG, Lung-Chang. Geomorphic characteristics of hillslope and channelized debris flows: a case study in the shitou area of central taiwan. **Journal Of Mountain Science**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 266-273, 4 ago. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11629-009-0250-0>

CHEN, S. C.; WU, C. Y. Debris flow disaster prevention and mitigation of non-structural strategies in Taiwan. **Journal of Mountain Science**, v. 11 (2), p. 308-322. 2014.

CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics** (680 pp.) McGraw-Hill, New York. 1959.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CHU, J. Basic characteristics of sediment-water mixture with hyperconcentration. **Proc. 2nd Int'l Syrup on River Sedimentation**, Nanjing, China, pp.265-273, 1983 (em chinês).

COROMINAS, J. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33 (2), p. 260-271. 1996.

COSTA, J. E. Floods from dam failures. In: Baker, V.R., Patton, P.C. (Eds.), **Flood Geomorphology**. John Wiley and Sons, New York, p. 439– 463. 1988

COUSSOT, P. et al. Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 124, p. 865–868, 1998.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (2006). **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750.000.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. (2014). **Cartas de Suscetibilidade a movimentos gravitacionais e inundação**. Escala 1:30.000.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides investigation and mitigation. Transportation research board, **US National Research Council**. Special Report 247, Washington, DC, Chapter 3, p. 36–75. 1996.

DAI, F.C; LEE, C.F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. **Geomorphology**, [S.L.], v. 42, n. 3-4, p. 213-228, jan. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0169-555x\(01\)00087-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0169-555x(01)00087-3)

DANTAS, M. E.; VIERO, A. C.; SILVA, D. R. A. "Origem das Paisagens", in **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Org. por Vieiro, A. C. & Silva, D. R. A. ed. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Porto Alegre/BR, p. 35-50. 2010.

DAVIES, T.; PHILLIPS, C.; WARBURTON, J.. 7.15 Processes, Transport, Deposition, and Landforms: flow. **Treatise On Geomorphology**, [S.L.], p. 158-170, 2013. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-374739-6.00160-3>

DIETRICH, W., WILSON, C., RENEAU, S. (1986). Hollows, colluvium, and landslides in soil-mantled landscapes.

DU, R.; KANG, Z.; CHEN, X.; ZHU, P. A Comprehensive Investigation and Control Planning for Debris Flow in the Xiaojiang River Basin of Yunnan Province. **Science Press**, 287. 1987.

EINSTEIN, A., "Investigation on the theory of Brownian Movement." **Dover Publications, Inc.**, New York, 1956.

ELLEN, S. D.; FLEMING, R.W. Mobilization of debris flow from soil slips, San Francisco Bay region, California. Geological Society of America. **Reviews in Engineering Geology**, v. VII. 1987.

EMBRAPA. SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS, 2 ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA, 2006, p. 306.

FACURI, G. G; PICANÇO, J. L. Evaluations and proposals for the debris flow hazard mapping method of the GIDES Project. **Landslides**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 339-352, 12 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

FANNIN, R. J., ROLLERSON T. P. Debris Flow: some physical characteristics and behavior. **Canadian Geotech.** J. 30, 71-81. 1993.

FANNIN, R.J.; WISE, M.P. An empirical–statistical model for debris flow travel distance. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 38, 982–994. 2001.

FISCHER, L.; RUBENSDOTTER, L.; SLETTEN, K.; STALSBERG, K.; MELCHIORRE, C.; HORTON, P.; JABOYEDOFF, M. **Debris flow modeling for susceptibility mapping at regional to national scale in Norway**, *In:*

**PROCEEDINGS OS THE 11th INTERNATIONAL AND 2nd NORTH AMERICAN SYMPOSIUM ON LANDSLIDES**, Simpósio. Banff, Alberta, Canada. 2012.

FREEMAN, T. G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 413–422, 1991.

GABET, E. J.; MUDD, S. M. The mobilization of debris flows from shallow landslides. **Geomorphology**, [S.L.], v. 74, n. 1-4, p. 207-218, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.08.013>

GHAZIPOUR, N; SIMPSON, G. Size distribution and controls of landslides in the Zagros mountain belt (Iran). **Tectonic Evolution, Collision, And Seismicity Of Southwest Asiain Honor Of Manuel Berberian’s Forty-Five Years Of Research Contributions**, [S.L.], p. 1-23, 2016. Geological Society of America. [http://dx.doi.org/10.1130/2016.2525\(13\)](http://dx.doi.org/10.1130/2016.2525(13))

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M.; CORREA, G. P.; ROCHA, H. L.; GIGLIO, J. N. DESASTRE HIDROLÓGICO RESULTANTE DAS CHUVAS INTENSAS EM RIO DOS CEDROS – SC. XVIII **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2009.

GRISWOLD, J.P.; IVERSON, R.M. Mobility statistics and automated hazard mapping for debris flows and rock avalanches. **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report**. 2008.

GUINAU, M.; VILAJOSANA, I.; VILAPLANA, J. M. GIS-based debris flow source and runoff susceptibility assessment from DEM data – a case study in NW Nicaragua, **Natural Hazards Earth System Sciences**, 7, p. 703-716. 2007.

GUIRRO, M. **RECONSTRUÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DE EVENTO DE INUNDAÇÃO, TESTANDO A HIPÓTESE DE ROMPIMENTO DE BARRAGEM NATURAL, NA REGIÃO DO MUNICÍPIO DE ROLANTE (RS)**. 2020. 153p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR/RS.

GUO, D. P.; HAMADA, M.; HE, C. An evaluation of influential factors on landslide mobility during the 2008 Wenchuan earthquake. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, p. 613-647. 2014

GUO, W; XU, X; WANG, W; LIU, Y; GUO, M; CUI, Z. Rainfall-triggered mass movements on steep loess slopes and their entrainment and distribution. **Catena**, [S.L.], v. 183, p. 104238, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2019.104238>.

GUO, X.; CUI, P.; CHEN, X.; LI, Y.; ZHANG, J.; SUN, Y. Estimation of discharges of water flows and debris floods in a small watershed. **Earth Surface Processes and Landforms**. 2020. doi:10.1002/esp.5053

GUTHRIE, R.H.; HOCKIN, A.; COLQUHOUN, L.; NAGY, T.; EVANS, S.G.; AYLES, C.. An examination of controls on debris flow mobility: evidence from coastal British Columbia. **Geomorphology**, [S.L.], v. 114, n. 4, p. 601-613, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.021>.

GUZZETTI, F; ARDIZZONE, F; CARDINALI, M; ROSSI, M; VALIGI, D. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. **Earth And Planetary Science Letters**, [S.L.], v. 279, n. 3-4, p. 222-229, 30 mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2009.01.005>

HAAS, T. de; DENSMORE, A.L.; STOFFEL, M.; SUWA, H.; IMAIZUMI, F.; BALLESTEROS-CÁNOVAS, J.A.; WASKLEWICZ, T.. Avulsions and the spatio-temporal evolution of debris-flow fans. **Earth-Science Reviews**, [S.L.], v. 177, p. 53-75, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.007>

HAN, Z; CHEN, G; LI, Y; XU, L; ZHENG, L; ZHANG, Y. A new approach for analyzing the velocity distribution of debris flows at typical cross-sections. **Natural Hazards**, [S.L.], v. 74, n. 3, p. 2053-2070, 17 jun. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-014-1276-3>

HEIM, A. Bergsturz und Menschenleben. **Zurich: Fretz and Wasmuth Verlag**, p. 218. 1932.

HOFMEISTER, R. J.; MILLER, D. J.; MILLS, K. A.; HINKLE, J. C.; BEIER, A. E. Geographic Information System (GIS) Overview map of potential rapidly moving landslides in Western Oregon. **Oregon Department of Geology and Mineral Industries Interpretive Map Series IMS-22**. 2002.

HÖBLING, D; EISANK, C; ALBRECHT, F; VECCHIOTTI, F; FRIEDL, B; WEINKE, E; KOCIU, A. Comparing Manual and Semi-Automated Landslide Mapping Based on Optical Satellite Images from Different Sensors. **Geosciences**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 37, 19 maio 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences7020037>.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol Soe. Am. Bull.**, v.56, n.3, p.275-370, 1945.

HORTON, P., Jaboyedoff, M., Bardou, E., 2008. **Debris flow susceptibility mapping at a regional scale. In: PROC. OF THE 4th CANADIAN CONFERENCE ON GEOHAZARDS**, Conferência. Quebec, Canada, pp. 339–406.

HORTON, P.; JABOYEDOFF, M.; RUDAZ, B.; ZIMMERMANN, M. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale, **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 13, 869-885, doi:10.5194/nhess-13-869-2013, 2013.

HUNGR, O.; MORGAN, G.C.; KELLERHALS, R. (1984). Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 21, pp 663-677. 1984.

HUNGR, O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. **Canadian Geotechnical Journal**. p. 610-623. 1995.

HUNGR, O.; EVANS, S. G.; BOVIS, M.; HUTCHINSON, J. N. A review of the classification of landslides of the flow type. **Environmental Engineering and Geoscience**, v. VII, p. 221–238. 2001.

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Springer-Verlag Berlin Heidelberg**. (2014).

HURLIMANN, M.; RICKENMANN, D.; MEDINA, V.; BATEMAN, A. Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazards assesment. **Engineerin Geology**, 102, p. 152-163. 2008.

HÜRLIMANN, M; MCARDELL, B. W.; RICKLI, C. Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in Switzerland. **Geomorphology**, [S.L.], v. 232, p. 20-32, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.11.030>

HUTCHINSON, J. N. **General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: PROCEEDINGS OF THE 5th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES**, Simpósio, Lausanne, 1, p. 3–35. 1988.

ILINCA, V. Using morphometrics to distinguish between debris flow, debris flood and flood (Southern Carpathians, Romania). **Catena**, [S.L.], v. 197, p. 104982, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2020.104982>.

IMAIZUMI, F; SIDLE, R. C.; TSUCHIYA, S; OHSAKA, O. Hydrogeomorphic processes in a steep debris flow initiation zone. **Geophysical Research Letters**, [S.L.], v. 33, n. 10, p. 1-4, maio 2006. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2006gl026250>

IMAIZUMI, F; SIDLE, R. C. Linkage of sediment supply and transport processes in Miyagawa Dam catchment, Japan. **Journal Of Geophysical Research**, [S.L.], v. 112, n. 3, p. 1-17, 4 ago. 2007. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2006jf000495>

IVERSON, R. M. Sensitivity of stability analyses to groundwater data, *In: LANDSLIDES (PROCEEDINGS OF THE SIXTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 1)* edited by D. H. Bell, pp. 451-457, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1992.

IVERSON, R. M. The physics of debris flow. **American Geophysical Union**, v. 35, 3, p. 245-296. 1997.

IVERSON, Richard M.; REID, Mark E.; LAHUSEN, Richard G. Debris Flow Mobilization from Landslides. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences** 1997 25:1, 85-138. 1997.

IVERSON, R.M.; SCHILLING, S.P.; VALLANCE, J. W. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. **Geol. Soc. Am. Bull.** v. 110, p. 972–984. 1998.

IVERSON, R.M. Debris flow, In: GOUDIE, A. S. (ed.) **Encyclopedia of Geomorphology**, London: Routledge, p.225. 2004.

IVERSON, R. M. Debris-flow mechanics. **Debris-Flow Hazards And Related Phenomena**, [S.L.], p. 105-134, 2005. Springer Berlin Heidelberg. [http://dx.doi.org/10.1007/3-540-27129-5\\_6](http://dx.doi.org/10.1007/3-540-27129-5_6).

IVERSON, R. M.; LOGAN, M; LAHUSEN, R. G.; BERTI, M. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. **Journal Of Geophysical Research**, [S.L.], v. 115, n. 3, 10 jul. 2010. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2009jf001514>

JABOYEDOFF, M; CARREA, D; DERRON, M-H; OPPIKOFER, T; PENNA, I. M; RUDAZ, B. A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 267, p. 105478, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105478>

JACKSON, L. E. Frequency and Magnitude of Events. In: Bobrowsky P.T. (eds) Encyclopedia of Natural Hazards. **Encyclopedia of Earth Sciences Series**. Springer, Dordrecht. 2013.

JAKOB, M.; HUNGR, O. Debris-flow Hazard and Related Phenomena. **Springer Praxis Book**, v. 1, p. 739. 2005.

JOHNSON, A.M. Debris flow. In: Brunsden, D., Prior, D.B. (Eds.), **Slope Instability**. **John Wiley and Sons**, Chichester, p. 257–361. 1984.

JOHNSON, A.C., MCGEE, K.E., SWANSTON, D.N. Landslide initiation, runout, and deposition within clearcuts and old-growth forests of Alaska. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 36, p.17–30. 2000.

KANG, S; LEE, S; VASU, N. N.; PARK, J; LEE, D-H. Development of an initiation criterion for debris flows based on local topographic properties and applicability assessment at a regional scale. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 230, p. 64-76, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.09.017>

KANG, S.; LEE, S-R. Debris flow susceptibility assessment based on an empirical approach in the central region of South Korea. **Geomorphology**, v. 308, p 1-12. 2018.

KAPPES, M. S.; MALET, J. P.; REMAITRE, A.; HORTON, P.; JABOYEDOFF, M.; BELL, R. Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. **Natural Hazards And Earth System Science**, v. 11, n. 2, p. 627-641. 2011.

KELLER, E.A., SWANSON, F.J., 1979. Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. **Earth Surf. Process.** 4, 361–380.

KLAR, A.; AHARONOV, E.; KALDERON-ASAEL, B.; KATZ, O.. Analytical and observational relations between landslide volume and surface area. **Journal Of Geophysical Research: Earth Surface**, [S.L.], v. 116, n. 2, p. 1-10, 2 abr. 2011. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2009jf001604>.

KOBIYAMA, M.; SILVA, R. V.; CHECCIA, T.; ALVES, A. **Mapeamento de Área de Perigo com Consideração do Alcance da Massa Deslizada: Estudo de Caso.** In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS.** Anais. Florianópolis, 2004, p. 117-128.

KOBIYAMA, M.; CHAFFE, P.L.B.; GOERL, R.F.; GIGLIO, J.N.; REGINATTO, G.M.P. Hydrological disasters reduction: lessons from hydrology. In: SENS, M.L.; MONDARDO, R.I. (orgs.) **Science and Technology for Environmental Studies: Experiences from Brazil, Portugal and Germany.** Florianópolis: Federal University of Santa Catarina, 2010. p.49-72.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; CORREA, G. P.; MICHEL, G. P. Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorological and geomorphic aspects. Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows III. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, V 67, p. 77-88. 2010.

KOBIYAMA, M. e MICHEL, G. P. **Histórico de ocorrência de fluxos de detritos e seus estudos no Brasil.** In: **XI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS.** Anais. João Pessoa/PB. 2014.

KOZCIAK, S. **Análise determinística da estabilidade de vertentes na bacia do rio Marumbi – Serra do Mar – Paraná.** Tese (Doutorado). 2005. Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Geologia. Curitiba, PR.

KRENCHEV, D; KENDEROVA, R; MATEV, S; NIKOLOVA, N; RACHEV, G; GERA, M. Debris flows in Kresna Gorge (Bulgaria)-geomorphological characteristics and weather conditions. **Journal Of The Geographical Institute Jovan Cvijic, Sasa**, [S.L.], v. 71, n. 1, p. 15-27, 2021. National Library of Serbia. <http://dx.doi.org/10.2298/ijgi2101015k>

KRONE, R. B. (1984), The significance of aggregate properties to transport processes. **Lecture Note on Estuarine Cohesive Sediment Dynamics**, ed. by A. J. Mehta pp. 66-84, 1984.

LANCASTER, S.T.; HAYES, S.K.; GRANT, G.E. Effects of wood on debris flow runoff in small mountain watersheds. **Water Resources Research**, 39(6). 2003.

LARSEN, I. J.; MONTGOMERY, D. R.; KORUP, O. Landslide erosion controlled by hillslope material. **Nature Geoscience**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 247-251, 28 fev. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo776>.

LEOPOLD, L. B.; MADDOCK, T. The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications. **Geological Survey**, 252. 1953.

LIMA, I. F.; FERNANDES, N. F.; VARGAS JUNIOR, E. A. ANÁLISE MORFOMÉTRICA EM BACIAS AFETADAS POR FLUXOS DE DETRITOS NA REGIÃO SERRANA DO RIO DE JANEIRO. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 1-21, 1 abr. 2020. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1515>

LIU, Y. Y.; MAIDMENT, D. R.; TARBOTON, D. G.; ZHENG, X.; YILDIRIM, A.; SAZIB, N. S.; WANG, S. 2016. **A CyberGIS Approach to Generating High-resolution Height Above Nearest Drainage (HAND) Raster for National Flood Mapping**, CyberGIS 16, The Third International Conference on CyberGIS and Geospatial Data Science, Urbana, Illinois, 26-28. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24234.41925>

LO, D. O. K. **Review of natural terrain landslide debris-resisting barrier design**. GEO Report No. 104, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, The Government of Hong Kong Special Administrative Region. 2000.

LORENTE, A.; GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; ARNAÉZ, J. Factors Explaining the Spatial Distribution of Hillslope Debris Flows. **Mountain Research and Development**, 22(1), p. 32–39. 2002.

LORENTE, A.; BEGUERÍA, S.; BATHURST, J. C.; GARCÍA-RUIZ, J. M.. Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees. **Natural Hazards And Earth System Sciences**, [S.L.], v. 3, n. 6, p. 683-691, 31 dez. 2003. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-3-683-2003>

LOUP, B., EGLI T., STUCKI, M. et al. (2012). Impact pressures of hillslope debris flows - back-calculation and simulation (RAMMS). 12th **Congress INTERPRAEVENT**. 225-236.

MAJOR, J. J. Depositional process in large scale debris flow experiments. **The Journal of Geology**, v. 105, p. 345-366. 1997.

MARCHESINI, I.; ROSSI, M., ALVIOLI, M., SANTANGELO M. CARDINALI, M. **Slope – catchment area relationship for debris-flow source area identification**. in ALVIOLI, M.; MARCHESINI, I.; MELELLI, L.; GUTH, P. (2020) Proceedings of the Geomorphometry 2020 Conference, Perugia, Italy, CNR Edizioni, 266 p., doi:10.30437/GEOMORPHOMETRY2020.

MCDUGALL, S; HUNGR, O. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. **Canadian Geotechnical Journal**, [S.L.], v. 41, n. 6, p. 1084-1097, 1 dez. 2004. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/t04-052>

MCDUGALL, S. 2014. Canadian Geotechnical Colloquium: landslide runout analysis: current practice and challenges. **Canadian Geotechnical Journal**, [S.L.], v.



54, n. 5, p. 605-620, maio 2017. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2016-0104>

McKINNON, M. Landslide Runout Statistical Analysis of Physical Characteristics and Model Parameters. Vancouver, Canada. 2010.

MEJIA, A.I.; REED, S.M. Role of channel and floodplain cross-section geometry in the basin response. **Water Resources Research**, v. 47, n. 9. 2011.

MELO, R.; ZÊRERE, J. L. Modeling debris flow initiation and runout in recently burned áreas using data-driven methods. **Natural Hazards**, 88, p. 1373-1407. 2017.

MERGILI, M; FELLIN, W; MOREIRAS, S. M.; STÖTTER, J. Simulation of debris flows in the Central Andes based on Open Source GIS: possibilities, limitations, and parameter sensitivity. **Natural Hazards**, [S.L.], v. 61, n. 3, p. 1051-1081, 7 set. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-9965-7>.

MERGILI, M.; KRENN, J.; CHU, H. J. R.randomwalk v1, a multi-functional conceptual tool for mass movement routing. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 12, p. 4027–4043, 2015.

MICHEL, G.P.; SCHWARZ, H.; ABATTI, B.H.; PAUL, L.R.; SILVA, M.A.; ZANANDREA, F.; SALVADOR, C.G.; CENSI, G.; BIEHL, A.; KOBAYAMA, M. Relatório técnico dos desastres de dezembro de 2020 nos municípios de Presidente Getúlio, Ibirama e Rio do Sul -SC. **Relatório**. Volume I. Porto Alegre: GPDEN/IPH/UFRGS, 2021. 53 p.

MIZUYAMA, T.; KOBASHI, S.; OU, G. Prediction of debris flow peak discharge, **Proceedings of the International Symposium “Interpraevent”**, Bern, Switzerland (Vol. 4, p. 99-108). Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt, Austria. 1992.

MONTE, B. E. O.; ZANANDREA, F.; ABATTI, B. H.; TAVARES, M. H.; SILVEIRA, A. L. L. Capacidade do modelo HAND na representação de uma mancha de inundação comparado ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D. In **Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Foz do Iguaçu/PR. 2019.

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, 1994.

MOORE, R.; LEE, E. M.; PALMER, J. S. A sediment budget approach for estimating debris flow hazard and risk: Lantau, Hong Kong. **Instability, Planning and Management: seeking sustainable solutions to ground movement problems**. (Eds: McInnes, R. G. & Jakeways, J.). London: Thomas Telford Publishing. 2002.

MORENO-ALFONSO, S. C.; SANCHEZ, J. J.; MURCIA, H. Evidences of an unknown debris avalanche event (<0.58 Ma), in the active azufreal volcano (Nariño,

Colombia), **Journal of South American Earth Sciences**, Volume 107, 2021, 103138, ISSN 0895-9811, 2021.

NAKATANI, K.; WADA, T.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Development of “Kanakano 2D (Ver.2.00),” a user-friendly one- and two-dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 1, n. 2, p. 62-72. 2008.

NETTLETON, I. M.; MARTIN, S.; HENCHER, S.; MOORE, R. **Debris flow types and mechanisms**, in: M. G. Winter, F. MacGregor & L. Shackman (eds) *Scottish Road Network Landslides Study*. 2005.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y.; FULLERTON, W. T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation, **Journal of Hydrology. Engineering**, 119(2), p. 244–261. 1993.

OKUDA, S.; SUWA, H.; OKUNISHI, K.; NAKANO, K.; YOKOYAMA, K. Synthetic observation on debris flow. Part 3. Observation at valley Kamikamihorizawa of Mt. Yakedake in 1976. *Annuals DPRI 20B-1*, p. 237–263. 1977. (Japonês).

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. **Terrain Stability Mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00**. Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, B.C. Canada.1998.

PAIVA, R.C.D., COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, v. 406, p. 170–181. 2011.

PAIXAO, M. A. **Análise de sensibilidade do modelo de fluxos de detritos – KANAKO-2D**. (2017). 98p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR/RS.

PARK, D.W.; LEE, S.R.; VASU, N.N.; KANG, S.H.; PARK, J.Y. Coupled model for simulation of landslides and debris flows at local scale. **Natural Hazards** 81, p. 1653–1682. 2016.

PASTORELLO, R.; MICHELINI, T.; D'AGOSTINO, V. On the criteria to create susceptibility map to debris flow at a regional scale using Flow-R. **Journal of Mountain Science**, 14(4), p. 621-635. 2017.

PASTORELLO, R; D'AGOSTINO, V; HÜRLIMANN, M. Debris flow triggering characterization through a comparative analysis among different mountain catchments. **Catena**, [S.L.], v. 186, p. 104348, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2019.104348>.

PAUL, L. R. **Proposição de modelo para simulação de fluxos de detritos em escala de bacia**. 2020. 204 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2020.

PERUZZETTO, M.; MANGENEY, A.; BOUCHUT, F. GRANDJEAN, G. LEVY, C. et al. , Topography curvature effects in thin-layer models for gravity-driven flows without bed erosion. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, American Geophysical Union/Wiley, 2021, 126 (4), 2020. pp. doi.10.1029/2020JF005657

PIERSON, T., COSTA, J., 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows, in: Costa, J.E. & W.G.F. (Ed.), **Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation**. Geological Society of America, pp. 1–12.

PIRULLI, M.; SORBINO, G. (2008). Assessing potential debris flow runout: a comparison of two simulation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, pp. 961–971, RAZACK, R. (2014). Dam break analysis using GIS applications. **International Journal of Engineering Research & Technology**, 3(3), pp. 1157-1161.

PROCHASKA, A. B.; SANTI, P. M.; HIGGINS, J. D.; CANNON, S. H. A study of methods to estimate debris flow velocity. **Landslides**, 5, p. 431-444. 2008

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

REID, M. E.; JEFFREY, A. C.; DIANNE, L. B. Forecasting inundation from debris flows that grows volumetrically during travel, with application to the Oregon Coast Range, USA. **Geomorphology**, 273, p. 396-411. 2016.

REGMI, N. R.; GIARDINO, J. R.; MCDONALD, E. V.; VITEK, J. D.. A Review of Mass Movement Processes and Risk in the Critical Zone of Earth. **Developments In Earth Surface Processes**, [S.L.], p. 319-362, 2015. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-444-63369-9.00011-2>.

RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3469-3481. 2008.

RICKENMANN, D; ZIMMERMANN, M. The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. **Geomorphology**, [S.L.], v. 8, n. 2-3, p. 175-189, 1993. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0169-555x\(93\)90036-2](http://dx.doi.org/10.1016/0169-555x(93)90036-2)

RICKENMANN, D.: 1994, An alternative equation for the mean velocity in gravel-bed rivers and mountain torrents, **Proc. 1994 Nat. Conf. on Hydraulic Engineering**, Buffalo N.Y., U.S.A., ASCE, Vol. 1, pp. 672–676.

RICKENMANN, D. Empirical Relationships for Debris Flows. **Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards**, vol. 19, issue 1, p. 47-77. 1999.

RICKENMANN, D.; WEBER, D.; STEPANOV, B. Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. In D. Rickenmann & C. I. Chen (Eds.), *Debris-Flow Hazards Mitigation. Mechanics, Prediction, and Assessment*. Proc. of the third Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, p. 883-894. 2003.

RICKENMANN, D. Runout Prediction Methods. In: M. Jakob, & O. Hungr, *Debris Flow Hazards and Related Phenomena*. **Springer Berlin Heidelberg: Praxis**. p. 305-324. 2005.

RICKENMANN, D.; SCHEIDL, C.. Debris-Flow Runout and Deposition on the Fan. **Advances In Global Change Research**, [S.L.], p. 75-93, 3 maio 2013. Springer Netherlands. [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4336-6\\_5](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4336-6_5)

ROCHA, H. L. APLICAÇÃO DO MODELO FLO-2D PARA SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE DETRITOS NA BACIA DO RIO CUNHA, RIO DOS CEDROS/SC. Dissertação de Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL. Florianópolis. 2011.

RUBENSDOTTER, L. SLETTEN, K., SANDOY, G. (2021) Morphological description of erosional and depositional landforms formed by debris flow processes in mainland norway. In: Beylich A. A. (ed) (2021) **Landscapes and Landforms of Norway**, Springer.

SALVADOR, C. G. **Utilização da ferramenta Avalanche Runout para geração de mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar – Alto Feliz, RS**. 2018. 87p. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília: **Embrapa**, 353p. 2013.

SCHEIDEGGER, A. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. **Rock Mechanics**. p. 231-236. 1973.

SCHEIDL, C.; RICKENMANN, D. (2010). Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. **Earth surface processes and landforms**. v. 35, pp 157-173

**SEDEC** - Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil SEDEC/MDR. Volume 4 - Manual Técnico para Intervenções Estruturais para Fluxo de Detritos.2018.

SELBY, M. J. 1993. **Hillslope: materials & processes**, New York.

SEMA; GPDEN/IPH/UFRGS (2017) Diagnóstico preliminar. Departamento de Recursos Hídricos da SEMA e Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais do IPH/UFRGS. Porto Alegre: DRH/SEMA, 26p. Disponível em [http://www.rs.gov.br/upload/20170125183225diagnostico\\_preliminar\\_gt\\_rolante\\_revfinal.pdf](http://www.rs.gov.br/upload/20170125183225diagnostico_preliminar_gt_rolante_revfinal.pdf)

SHARPE, C. F. **Landslides and Related Phenomena**. Columbia University Press, New York. 1938.

SIMONETT, D.S., Landslide distribution and earthquakes in the Bewani and Torricelli Mountains, New Guinea. In: Jennings, J.N., Mabbutt, J.A. (Eds.), **Landform Studies from Australia and New Guinea**. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 64–84. 1967.

SLAYMAKER, O. The distinctive attributes of debris torrents. *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*, v. 33, p. 567-573. 1988.

SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI L. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. **Natural Hazards**, n. 53, p. 313-332, 2010.

STINY, J. Die Muren. Verlag der Wagner'schen Universitäts-buchhandlung, Innsbruck. **Debris Flow** (Traduzido por M. Jacob e N. Skermer 1997,p. 106. Vancouver, Canada: EBA Engineering Consultants.1910.

SWANSTON, D.N., SWANSON, F.J., 1976. Timber harvesting, mass erosion, and steepland forest geomorphology in the Pacific Northwest. In: Coates, D.R. (Ed.), **Geomorphology and Engineering**. Dowden, Hutchinson & Ross, pp. 199–221.

TARBOTON, T. “A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models”. **Water Resources Research**. v. 33, n. 2, pp. 309-319. 1997.

TAROLLI, P; FONTANA, G. D. Hillslope-to-valley transition morphology: new opportunities from high resolution dtms. **Geomorphology**, [S.L.], v. 113, n. 1-2, p. 47-56, dez. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.006>

TAKAHASHI, T. A mechanism of occurrence of mud-debris flows and their characteristics in motion. **Annuals**. DPRI, v. 20B-2; p. 405-435. 1977.

TAKAHASHI, T. **Debris flow**. Rotterdam: Balkema, 165p. 1991.

TAKAHASHI, T. **Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures**. CRC press, 2014.

TEN BRINK, U.S., GEIST, E.L., ANDREWS, B.D. Size distribution of submarine landslides and its implication to tsunami hazard in Puerto Rico. **Geophysical Research Letters** 33, 2006.

TESFA, T. K.; TARBOTON, D. G.; WATSON, D. W.; SCHREUDERS, K.A.T.; BAKER, M. E.; WALLACE, R. M.. Extraction 506 of hydrological proximity measures from DEMs using parallel processing. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], 507 v. 26, n. 12, p. 1696-1709, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.018>

TSAI, Y-F. Three-dimensional topography of debris-flow fan. *J. Hydraul. Eng.*, 132, p. 307–318. 2006.

TSENG, C-M; LIN, C-W; STARK, C. P.; LIU, J-K; FEI, L-Y; HSIEH, Y-C. Application of a multi-temporal, LiDAR-derived, digital terrain model in a landslide-volume estimation. ***Earth Surface Processes And Landforms***, [S.L.], p. 1-15, jul. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3454>.

TSUNETAKA, H., MTIBAA, S., ASANO, S. *et al.* Comparison of length and dynamics of wood pieces in streams covered with coniferous and broadleaf forests mapped using orthophotos acquired by an unmanned aerial vehicle. ***Prog Earth Planet Sci*** 8, 22 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00419-6>

**USGS** - U.S. Geological Survey. Landslide Types and Processes. Factsheet 2004-3072, 2004, 4p.

VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES, J. N.; LIMA, D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90 m data. *Computer Geosciences*, 32, 1169–1181. 2006.

VAN WYK de VRIEWS, B.; DAVIES, T. 2015. Landslides, Debris Avalanches and Volcanic Gravitational Deformation. In: Inn Sigurdsson, H. (Ed.), ***Encyclopedia of volcanoes***, second ed. Elsevier, pp. 665–685. 38.

VARNES, D. Slope movement types and processes. In: R.J. Schuster and R.J. Krizek (eds), *Landslides, Analysis and Control*. . Transportation Research Board, **National Academy of Sciences**, Washington, DC. Special Report 176: p. 11-33. 1978.

VIEIRA, B. C.; **Previsão de escorregamentos translacionais rasos n a Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. 2007. 213 p. Tese (Doutorado) – Universidade Fderal do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia, Programa de Pós Graduação em Geografia. Rio de Janeiro, RJ.

WIECZOREK, G; MANDRONE, G.; DeCola, L. Influence of hillslope shape on debris-flow initiation. International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, **Prediction, and Assessment, Proceedings**. 21-31.1997.

WIGMOSTA, M. S. **Rheology and flow dynamics of the Toutle debris flows from Mt. St.Helens** (194 pp.). M. Sc. Thesis, University of Washington, Seattle. 1983.

WILDFORD, D. J.; SAKALS, M. E.; INNES, J. L.; SIDLE, R. C.; BERGERUD, W. A. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. ***Landslides***, 1, p. 61-66. 2004.

XIAO, C. TIAN, Y., LI, T., GAO, Z. DEM-based Slope Unit Derivation. **China Geological Survey Bureau**. 2013.

XU, H., SU, P., CHEN, Q. et al. Susceptibility areas identification and risk assessment of debris flow using the Flow-R model: a case study of Basu County of Tibet. *Geoenviron Disasters* 9, 13. 2022.

YANG, Q; CAI, F; UGAI, K; YAMADA, M; SU, Z; AHMED, A; HUANG, R; XU, Q. Some factors affecting mass-front velocity of rapid dry granular flows in a large flume. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 122, n. 3-4, p. 249-260, out. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.06.006>

Zanandrea, Franciele; Cardozo, Gabriel; Michel, Gean Paulo; Kobiyama, Masato. Parâmetros geomorfológicos para avaliação pós-desastre de escorregamentos: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Mascarada/RS. Encontro Nacional de Desastres (1., jul. 2018, Porto Alegre). **Anais**. Porto Alegre: ABRHidro,[2018]., 2018.

ZANANDREA, F.; MICHEL, G.P.; KOBIYAMA, M.; CARDOZO, G.L. Evaluation of different DTMs in sediment connectivity determination in the Mascarada River Watershed, southern Brazil. **Geomorphology**, v.332, p.80–87, 2019.

ZANANDREA, F. Índice de Conectividade Hidrossedimentológica para Bacias Montanhosas. 2020. 162 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2020a.

ZANANDREA, F.; MICHEL, G.P.; KOBIYAMA, M. Impedance influence on the index of sediment connectivity in a forested mountainous catchment. **Geomorphology**, v.351, Article 106962, 2020n.

ZANANDREA, F.; MICHEL, G.P.; KOBIYAMA, M.; CENSI, G.; ABATTI, B. H. Spatial-temporal assessment of water and sediment connectivity through a modified connectivity index in a subtropical mountainous catchment. **Catena**, [S.L.], v. 204, p. 105380, set. 2021.

ZÊZERE, J. L. **Relatório do programa de Dinâmica de Vertentes e Riscos Geomorfológicos**. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos, Área de Geografia Física e Ambiente. p. 127, 2005.

ZIMMERMANN, F; MCADELL, B. W.; RICKLI, C; SCHEIDL, C. 2D Runout Modelling of Hillslope Debris Flows, Based on Well-Documented Events in Switzerland. **Geosciences**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 70, 14 fev. 2020.

ZHENG, X.; MAIDMENT, D. R.; TARBOTON, D. G.; LIU, Y. Y.; PASSALACQUA, P.. GeoFlood: Large-scale flood inundation mapping based on high-resolution terrain analysis. **Water Resources Research**, 54, 10,013–10,033. 2018.

ZHOU, W.; FANG, J.; TANG, C.; YANG, G. Empirical relationships for the estimation of debris flow runout distances on depositional fans in the Wenchuan earthquake zone. **Journal of Hydrology**, 577, 11p. 2019.

ZHOU, W; QIU, H; WANG, L; PEI, Y; TANG, B; MA, S; YANG, D; CAO, M. Combining rainfall-induced shallow landslides and subsequent debris flows for hazard chain prediction. **Catena**, [S.L.], v. 213, p. 106199, jun. 2022. Elsevier BV.