

MAPEAMENTO DO RISCO DE FLUXO DE DETRITOS COM BASE EM MODELO GIS

Mapping of debris flow risk areas based on a GIS model

Paula Morais Canedo de Magalhães^a, Alberto S. F. Jardim Sayão^a

^a Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil

RESUMO – A identificação de áreas com predisposição à ocorrência de desastres naturais surge como informação importante, principalmente no contexto urbano. Sendo assim, o objetivo desse estudo é propor uma metodologia para o mapeamento de áreas de risco de fluxo de detritos, considerado como um dos acidentes naturais que mais provocam mortes e perdas materiais. Para tanto, esse estudo fez a modelagem de estabilidade das encostas diretamente num software GIS, em que foram utilizados o Modelo do Talude Infinito, para o cálculo da estabilidade, e do Método CN do SCS, como modelo de infiltração. Na análise de risco, considerou-se que Risco é definido pelo produto da probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos (Perigo), onde é avaliada a influência das características do meio físico e do seu processo deflagrador; com a severidade das suas consequências, medidas em termos de população afetada (Exposição) e suas fragilidades (Vulnerabilidade).

SYNOPSIS – The identification of areas prone to the occurrence of natural disasters is an important information, especially in urban areas. Therefore, this study aimed to propose a methodology for debris flow risk assessment, considered as one of the natural disasters that most cause deaths and material losses. To this end, this study made the slope stability modelling directly in a GIS software, in which the Infinite Slope Model was used for the slope stability calculation, and the SCS CN Method, as the infiltration model. For the risk assessment, Risk is defined by the product of the probability of the occurrence of a debris flow event (Hazard), where the influence of the environment's physical characteristics and its triggering process are evaluated; with the severity of its consequences, measured in terms of the affected population (Exposure) and its weaknesses (Vulnerability).

Palavras Chave – Fluxos de detritos; Sistema de Informação Geográfica; Mapeamento de risco.

Keywords – Debris flow; Geographic Information System; Risk mapping.

1 – INTRODUÇÃO

De acordo com *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR, 2020a) o termo desastre refere-se a “uma séria interrupção do funcionamento de uma comunidade ou sociedade envolvendo perdas e impactos em fatores humanos, materiais, econômicos e ambientais, de maneira a exceder a capacidade do elemento afetado de lidar com as consequências usando seus próprios recursos”. Segundo o relatório “*Human cost of disasters*” da UNDRR (UNDRR, 2020b), entre as duas última décadas do século passado (1980-1999) e as duas primeiras décadas do século atual (2000-2019) houve um significativo aumento do número de desastres ao redor do mundo (Quadro 1), principalmente daqueles relacionados ao aumento da temperatura média global, que por sua vez

E-mails: paulamoraiscanedo@gmail.com (P. Magalhães); sayao@puc-rio.br (A. Sayão)

contribuiu para o aumento da intensidade e frequência de eventos climáticos extremos como secas, furacões e chuvas torrenciais.

Quadro 1 – Total de desastres registrados divididos por tipo (mod. UNDRR, 2020a)

Período analisado	Secas	Terremotos	Temp. Extremas	Inundações	Deslizamentos	Mov. Massa Seca	Tempestades	Atividade Vulcânica	Queimadas
1980-1999	263	445	130	1389	254	27	1457	84	163
2000-2019	338	552	432	3254	376	13	2043	102	238

Os desastres devidos a chuvas intensas afetam principalmente áreas montanhosas, provocando inundações ao longo dos canais naturais de drenagem e escorregamentos nas encostas. Essa situação é típica da região serrana do estado do Rio de Janeiro - Brasil, cujos rios são hidraulicamente rápidos, com grande capacidade erosiva, dinamicamente relacionados com a intensidade das chuvas e marcados por enchentes de curta duração (Canedo *et al.*, 2011).

Em janeiro de 2011, a região serrana carioca foi palco de um dos maiores desastres socioambientais, decorrentes de chuvas intensas, ocorridos no último século (Coelho Netto *et al.*, 2013; Ximenes *et al.*, 2017). Nessa ocasião, fluxos de detritos (Figura 1) e outros movimentos de massa foram observados em diversos locais resultando em danos catastróficos (Valverde Sancho, 2016). Apesar de ter sido um evento atípico, alguns dos processos que potencializaram os danos ocorridos nesse evento são relativamente comuns e podem voltar a ocorrer, principalmente de forma localizada, como é o caso de fluxos de detritos.



Fig. 1 – Fluxo de detritos na região serrana do Rio de Janeiro, em 2011.

Nesse contexto, a identificação e o mapeamento das áreas com predisposição à ocorrência de processos naturais catastróficos surge como informação de extrema importância, sendo particularmente útil no planejamento urbano, zoneamento de risco e gestão ambiental. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi propor uma metodologia para o mapeamento de risco de fluxo de detritos visando auxiliar as autoridades responsáveis pela hierarquização e identificação de áreas com alto risco de ocorrência de fluxo de detritos, para auxiliar o ordenamento da ocupação do território.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção são apresentados os conceitos utilizados para o embasamento teórico do trabalho proposto no que se refere a fluxos de detritos e análise de risco.

2.1 – Fluxo de detritos

De maneira geral, os fluxos de detritos podem ser definidos como um movimento de massa catastrófico, que possui uma matriz de água e sedimentos (finos e grossos), que se move como um fluido contínuo e viscoso (Cruden e Varnes, 1996; Hutchinson, 1988; Takahashi, 2007).

Essa massa transportada nos talwegues costuma carrear uma mistura de água e materiais soltos (detritos) de baixa plasticidade, compostos por uma miscelânea de areias, siltes, blocos, e matacões, além de eventuais materiais orgânicos como troncos, galhos, entre outros. A quantidade e tipo de materiais envolvidos dependem das diferentes fontes de detritos disponíveis na encosta (Kobiyama *et al.*, 2014).

A viscosidade e o empuxo da massa transportada permitem que o fluxo de detritos seja capaz de suportar e movimentar grandes blocos rochosos devido às forças de atrito e colisão destes blocos com a mistura formada pelas partículas em movimento. Além disso, devido à sua fluidez, esse grande volume de material transportado pode alcançar longas distâncias (Alvarado, 2006; Nunes e Sayão, 2014).

Por essas implicações que envolvem este movimento, o fluxo de detritos normalmente é classificado como um movimento de massa catastrófico, sendo capaz de produzir alterações topográficas importantes, devido ao seu alto poder de erosão e destruição (Rodine, 1974; Takahashi, 2007). Hungr *et al.* (1984) descrevem as medidas possíveis para remediação dos danos causados por fluxos de detritos catastróficos.

2.2 – Análise de risco

O termo Risco tem vários significados e abrangência, que englobam fatores econômicos, sociais e ambientais (Samuels e Gouldby, 2009). Em engenharia, o termo Risco indica a combinação da probabilidade de ocorrer um acidente, ou evento danoso, e o impacto, ou consequência, correspondente, quantificado pelo número de vítimas ou prejuízos materiais, econômicos e ambientais (Sayers *et al.*, 2013; UNISDR, 2004, 2009), como indicado na Figura 2. Mais especificamente, o Risco (R) de um acidente é definido pelo produto indicado na equação seguinte:

$$R = H * C \quad (1)$$



Fig. 2 - Composição do risco (Zonensein, 2007)

sendo R o risco; H a probabilidade de ocorrência do acidente e C a consequências do acidente.

A probabilidade de ocorrer um acidente ou evento perigoso é também comumente chamada de “Perigo” (do inglês *hazard*) e refere-se à frequência temporal de um fenômeno, atividade humana ou condição capaz de causar danos ou prejuízos físicos, sociais e ambientais, perda de vidas, ou impactos à saúde, interrupção econômica, etc (Sayers *et al.*, 2013).

As consequências de um acidente podem ser quantificadas em termos de “Exposição” e “Vulnerabilidade”. A “Exposição” é uma medida direta da quantidade de bens, objetos, pessoas, infraestrutura, meio ambiente, serviços, processos produtivos, etc, que se localizam na área potencialmente afetada pelo “Perigo”. A “Vulnerabilidade” refere-se às características que potencializam os danos de um sistema, sendo influenciada pela propensão de um elemento (pessoa ou bem) sofrer um certo dano durante o acidente e pela importância relativa deste elemento (em termos econômicos, sociais, etc) (Sayers *et al.*, 2013).

Para fins deste trabalho, o Perigo corresponde à probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos, e a Consequência (que abrange os conceitos de Exposição e Vulnerabilidade), é definida pelos danos socioeconômicos.

3 – METODOLOGIA

Na metodologia proposta neste artigo, as etapas de cálculo para o mapeamento de risco estão mostradas na Figura 3. Ressalta-se que a metodologia faz uso de geoprocessamento e do sistema de informações geográficas (GIS), sendo necessário o uso de um *software* capaz de processar esses dados. Neste trabalho, foi utilizado o QGIS 3.16.

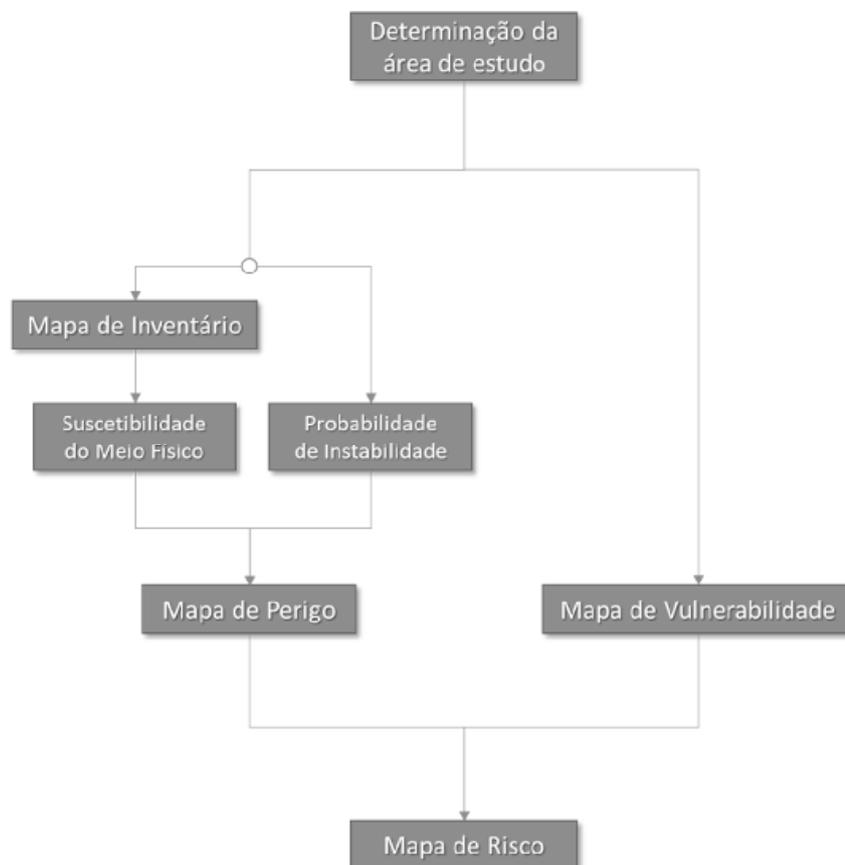


Fig. 3 - Fluxograma com a metodologia proposta (Magalhães, 2021)

Esse é um *software* GIS de código aberto desenvolvido pela *Open Source Geospatial* (OSGeo) que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados permitindo ao usuário criar mapas com várias camadas de diferentes informações (QGIS, 2021).

A metodologia proposta considera os seguintes 4 mapas:

- Mapa de Inventário: não é usado diretamente no cálculo do Risco, mas serve como base para a elaboração do Mapa de Perigo, contendo informações como tipo e distribuição espacial das cicatrizes dos eventos passados;
- Mapa de Perigo: indica a probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos;
- Mapa de Vulnerabilidade e Exposição: indica a quantidade de pessoas expostas a um fluxo de detritos, bem como a fragilidade frente a esse evento;
- Mapa de Risco: é obtido pelo produto dos Mapas de Perigo e de Vulnerabilidade e Exposição.

4 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Em 11 de janeiro de 2011, chuvas extremas serviram de gatilho para a maior catástrofe já ocorrida na região Serrana do Rio de Janeiro, Brasil, e um dos maiores desastres socioambientais ocorridos no último século (Coelho Netto *et al.*, 2013; Ximenes *et al.*, 2017). Esse evento atingiu 7 municípios (Nova Friburgo, Teresópolis, Petrópolis, São José do Vale do Rio Preto, Areal, Sumidouro e Bom Jardim) e afetou 305 mil pessoas, com 912 vítimas fatais oficiais, de acordo com os Dados da Defesa Civil Estadual. Com relação a perdas e danos, estimativas do Banco Mundial apontam para custos totais da ordem de R\$4,78 bilhões (Motta, 2014; Nunes, 2013; Ribeiro, 2015).

Essa chuva de grande intensidade, com tempo de recorrência de cerca de 350 anos, foi provocada pela conjugação de chuvas pré-frontais de longa duração, chuvas de verão de curta duração e alta intensidade, além da grande fonte de umidade proporcionada pela formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Esse evento hidrológico atípico incidiu sobre uma região de encostas com declives acentuados, vales estreitos, camada pouco espessa de solo e afloramentos rochosos nas partes elevadas (Canedo *et al.*, 2011).

Segundo Pinho *et al.* (2013), essas características físicas da região foram determinantes para a ocorrências de deslizamentos, fluxos de detritos e enxurradas, que conduziram lama e detritos ao longo dos vales. Além dessas fragilidades naturais, observa-se que a região sofreu com a ocupação desordenada do solo que levou a ocupação das chamadas “áreas de risco”, sobretudo, mas não exclusivamente, por populações de baixa renda, as quais constroem sem qualquer orientação técnica (Canedo *et al.*, 2011).

Dentre os municípios atingidos, Nova Friburgo foi o mais afetado, com 3.622 cicatrizes de deslizamentos registradas em uma área de 400 km² (Coelho Netto *et al.*, 2013; Medeiros e Barros, 2011; Telles *et al.*, 2015). Nesse município, um dos lugares mais atingidos foi a Bacia do Córrego D’Antas, onde houve deslizamentos translacionais rasos e fluxos de detritos, com grande destruição das áreas marginais dos canais, envolvendo casas, prédios e escolas (Ximenes *et al.*, 2017).

A Bacia do Córrego D’Antas, mostrada na Figura 4, possui cerca de 51,5 km², e está inserida no contexto morfológico da Serra do Mar, com precipitação média anual de 2.359 mm, sendo dezembro e janeiro os meses mais chuvosos. Os dados de precipitação apresentados na Figura 5 são referentes ao Posto Pluviométrico Piller, localizado em Nova Friburgo-RJ próximo à Bacia do Córrego D’Antas, e foram obtidos no Sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA). Esse sistema é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos (ANA, 2005).

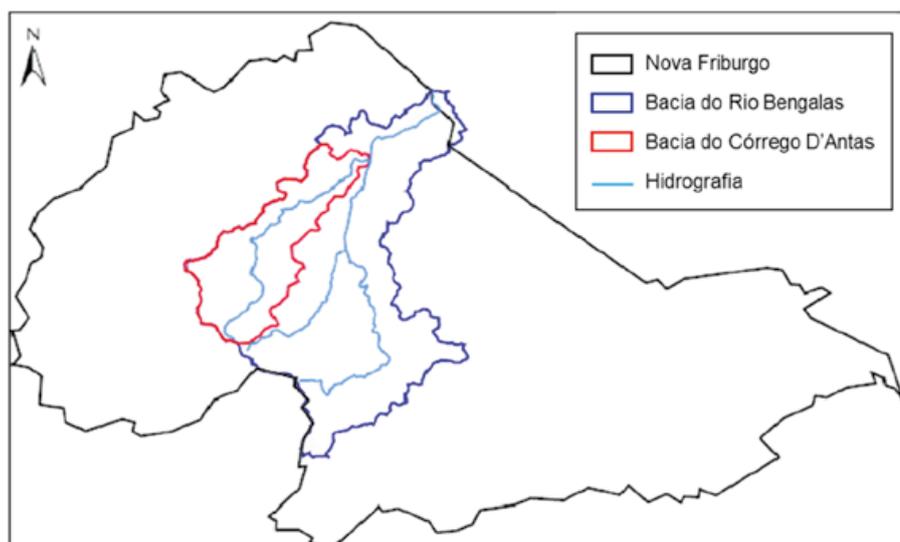


Fig. 4 – Delimitação do município de Nova Friburgo e das Bacias dos rios Bengala e Córrego D'Antas (Telles *et al.*, 2015).

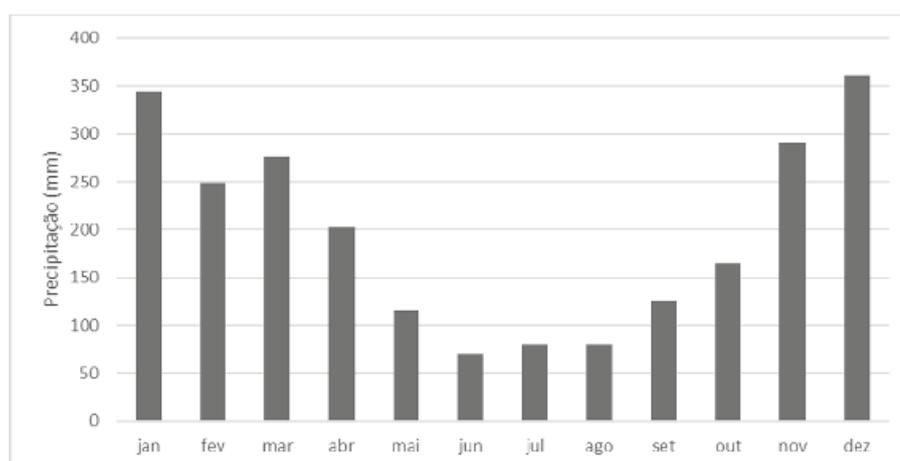


Fig. 5 – Precipitação média mensal na Bacia do Córrego D'Antas (ANA, 2005)

5 – RESULTADOS

A metodologia proposta realiza o mapeamento de risco de fluxo de detritos diretamente em um *software* GIS seguindo uma sequência simples de cálculos com baixo custo computacional. Ressalta-se também que todos os dados de entrada (*inputs*) necessários são do tipo *open-access* obtidos em sites de órgãos do governo brasileiro, o que facilita a replicabilidade em território nacional.

5.1 – Delimitação da área de estudo e Mapa de Inventário

Devido às suas características físicas e de movimento, os fluxos de detritos estão diretamente ligados a processos hidrológicos dentro de bacias hidrográficas (Zhang *et al.*, 2014). Estudar fluxo de detritos tomando como base a bacia hidrográfica pode ser observado nos trabalhos de Alexander (2008); Armas *et al.* (2013); Carrara *et al.* (1991); Gong *et al.* (2020); Lee e Park (2016); Li *et al.* (2019); Ray e Smedt (2009); Zhou *et al.* (2014). Essa forma de análise, comum em hidrologia e hidráulica, permite observar eventuais interações entre as áreas afetadas da bacia com as áreas vizinhas, o que leva a uma análise abrangente do problema.

A Bacia do Córrego D'Antas, apresentada na Figura 6a, foi traçada com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em escala 1:25.000. Já na Figura 6b é apresentado o Mapa de Inventário com a localização das 28 cicatrizes de fluxos de detritos identificadas por Silva (2016), a partir de imagens do aplicativo *Google Earth*, em 19/01/2011.

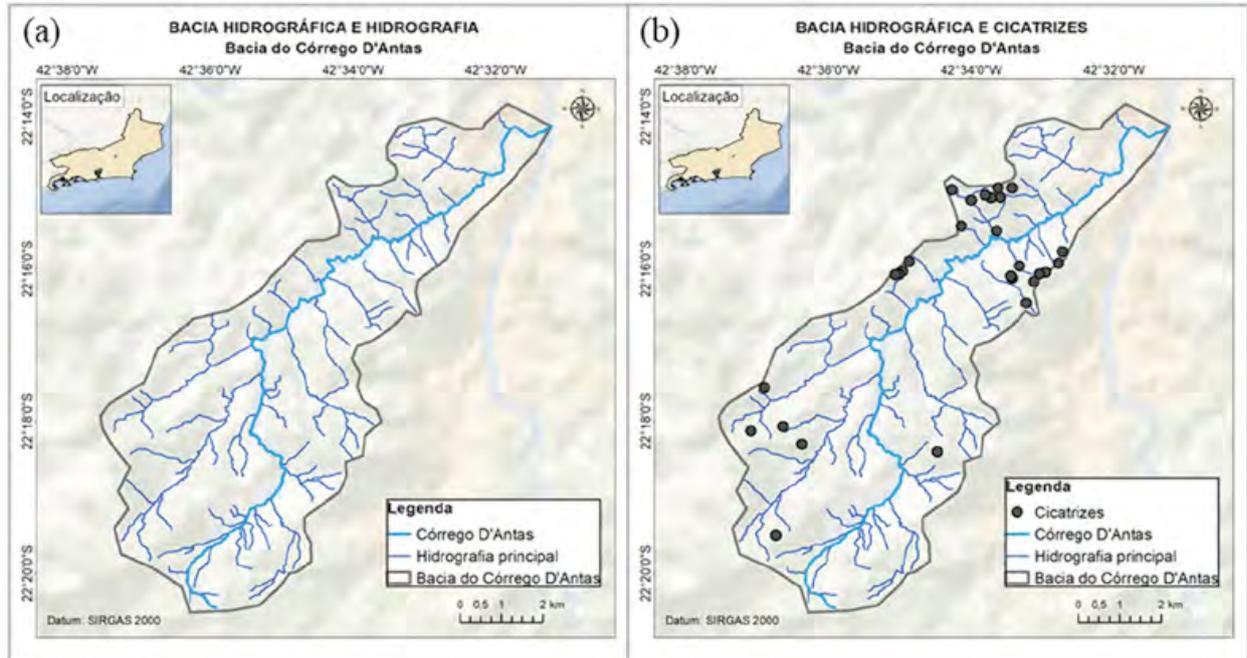


Fig. 6 – (a) Delimitação da Bacia; (b) Mapa de Inventário (Magalhães, 2021)

5.2 – Mapa de Perigo

No Mapa de Perigo é representada a probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos, cuja probabilidade está condicionada às características do meio físico e à probabilidade de ocorrência do processo deflagrador. Este mapa é obtido em duas etapas: (1) determinação da suscetibilidade do meio físico; (2) determinação da probabilidade de instabilidade.

5.2.1 – ETAPA 1: Determinação da suscetibilidade do meio físico

Li *et al.* (2019) sugerem que fatores como topografia, litologia, tipo e uso do solo condicionam a formação de fluxos de detritos. Nesse contexto, esse trabalho utilizou os seguintes critérios para a determinação da suscetibilidade do meio físico:

- Topográficos: Declividade, que tem influência no desencadeamento do movimento, e na capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas; Curvatura Vertical, que influencia os processos de transporte de sedimentos e acumulação de água (Valeriano, 2008); e Curvatura Horizontal, que influencia no direcionamento dos fluxos de água (Bigarella, 2003).
- Geológicos: Litologia da área estudada.
- Tipo e uso do solo: Valor Potencial Máximo de Retenção de Água no Solo (S). Ele representa o valor máximo de água, em milímetros, possível de infiltrar no terreno e é dado

em função do parâmetro adimensional CN¹ de acordo com a equação seguinte (Aron *et al.*, 1977; Hjelmfelt, 1980; Mishra e Singh, 2004; Zhou *et al.*, 2014):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

O valor de CN é determinado, com o auxílio do Quadro 2, a partir da combinação das características da cobertura da superfície com o Grupo Hidrológico do solo, que é uma divisão dos tipos de solo segundo suas características de taxa de infiltração e transmissividade, podendo ser do tipo A, B, C ou D.

Quadro 2 – Correlação entre Grupo Hidrológico e Cobertura da Superfície para obtenção de CN (Magalhães, 2021)

Cobertura da Superfície (uso do solo)	Grupo Hidrológico (tipo de solo)				
	A	B	C	D	ÁGUA
Vegetação secundária em estágio inicial	45	66	77	83	100
Reflorestamento	45	66	77	83	100
Vegetação secundária em estágio médio / avançado	25	55	70	77	100
Vegetação	36	60	73	79	100
Campo / pastagem	49	69	79	84	100
Solo exposto	68	79	86	89	100
Agricultura	39	61	74	80	100
Urbano	77	85	90	92	100
Mangue	90	90	90	90	100
Afloramento rochoso	90	90	90	90	100
Áreas úmidas	90	90	90	90	100
Sombra	60	60	60	60	100
Água	100	100	100	100	100

Cada um dos critérios selecionados constitui individualmente um mapa, cujas informações podem ser obtidas de órgãos nacionais brasileiros conforme apresentado no Quadro 3.

Importante mencionar que esses critérios possuem unidades distintas, portanto, antes de se proceder com a sua avaliação conjunta, todos os critérios precisam ser normalizados de modo a possuir a mesma escala de valores. Esse processo de normalização foi feito de acordo com a função genérica indicada na Figura 7 e utilizou a lógica *Fuzzy*, que permite a transformação de diferentes informações em uma mesma linguagem numérica, para permitir comparações entre elas (Burrough *et al.*, 2015).

A normalização de cada um desses mapas de critério pode ser observada na Figura 8, na seguinte ordem: Figura 8a – Mapa de Declividade; Figura 8b – Mapa de Curvatura Horizontal; Figura 8c – Mapa de Curvatura Vertical; Figura 8d – Mapa de Litologia; Figura 8e – Mapa de Infiltração (S).

Em seguida, para avaliar qual critério é mais influente na formação de fluxo de detritos seguiu-se com a aplicação da técnica AHP. Para cada par de critérios foi atribuída uma importância relativa, cujos valores compuseram uma matriz de comparação paritária (Quadro 4).

¹ Parâmetro pertencente ao Método do Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS) órgão do *United States Departmente of Agriculture* (USDA).

Quadro 3 – Informações dos critérios utilizados

Critério	Tipo de Informação	Origem do mapa	Fonte
Declividade	Topografia	Mapas derivados de um Modelo Digital e Elevação (MDE)	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
C. Horizontal			
C. Vertical			
Litologia	Geologia	Mapa de tipos litológicos	GEOBANK do Serviço Geológico Brasileiro – CPRM e trabalhos correlatos como Pelizoni (2014)
S	Uso e Tipo do Solo	Mapa derivado de mapas e uso e tipo de solo de acordo com o Método CN	Instituto Estadual do Ambiente – INEA e trabalhos correlatos, como (Genovez <i>et al.</i> , 2005)

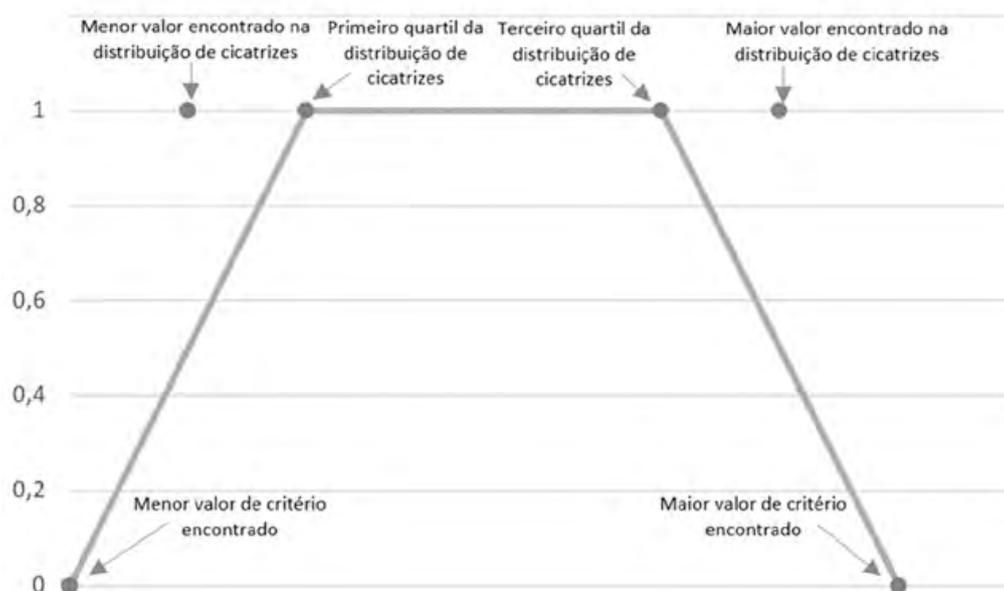


Fig. 7 – Ilustração genérica do processo de normalização (Magalhães, 2021)

Quadro 4 – Matriz de comparação paritária (Magalhães, 2021)

	Declividade	C. Vertical	C. Horizontal	Litologia	S
Declividade	1	5	4	5	5
C. Vertical	0,2	1	0,25	3	3
C. Horizontal	0,25	4	1	4	4
Litologia	0,2	0,33	0,25	1	1
Infiltração	0,2	0,33	0,25	1	1

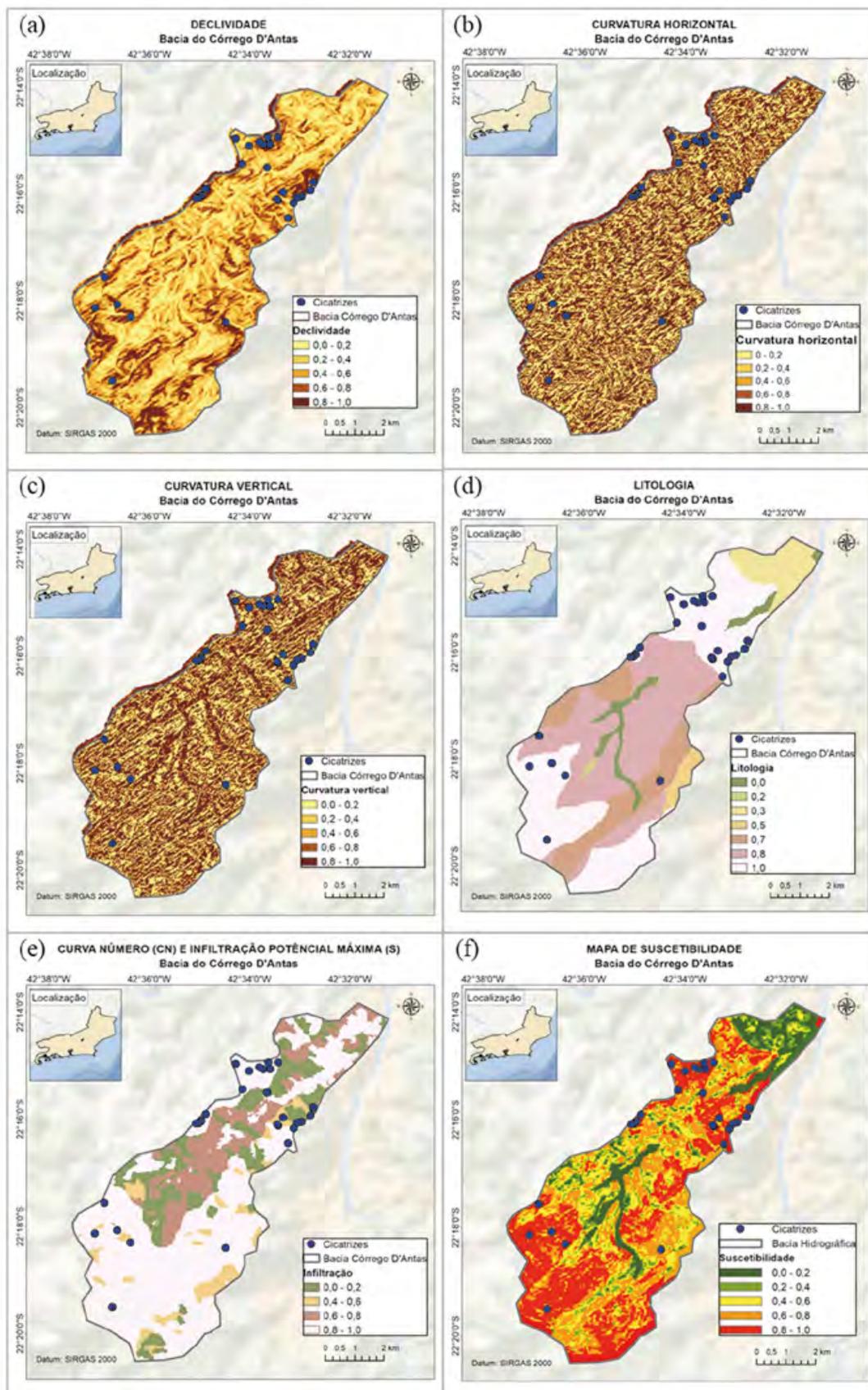


Fig. 8 – (a) Declividade; (b) Curvatura horizontal; (c) Curvatura vertical; (d) Litologia; (e) Infiltração; (f) Mapa de Suscetibilidade (Magalhães, 2021)

Uma vez definidas as importâncias relativas entre os critérios, deve-se avaliar o índice e a razão de consistência (IC e RC respectivamente). Esses valores são considerados aceitáveis quando forem menores do que 10%. Para a matriz de comparação apresentada o IC foi igual a 0,0819% e o RC igual a 0,073%.

É importante também, que o valor do autovalor máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) seja próximo ao valor da ordem da matriz de comparação paritária. A ordem da matriz utilizada é igual a 5 e o autovalor máximo foi igual a 5,37.

A suscetibilidade do meio físico em gerar fluxo de detritos, apresentada na Figura 8f no Mapa de Suscetibilidade, foi dada pela média ponderada dos critérios apresentados, onde os pesos de cada critério foram iguais ao autovetor da matriz de comparação paritária associado ao seu autovalor máximo. Os valores dos pesos estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Autovetor da matriz de comparação, ou seja, os pesos de cada critério (Magalhães, 2021)

Critério	Peso
Declividade	0,51
C. Vertical	0,12
C. Horizontal	0,25
Litologia	0,06
Infiltração (S)	0,06

Por fim, para se avaliar a consistência do Mapa de Suscetibilidade com os fluxos de detritos efetivamente gerados e apresentados no Mapa de Inventário, extraiu-se o valor da suscetibilidade obtida para cada ponto onde foi observada uma cicatriz de fluxo.

Se a suscetibilidade para uma dada cicatriz for superior a 70% (classificada como “alta” por Carrara *et al.*, 1991), considera-se como “sucesso”. No caso contrário, considera-se como “falha”. A avaliação de cada cicatriz é mostrada no Quadro 6.

O Mapa de Suscetibilidade apresentou uma percentagem de sucesso de 93%, indicando consistência alta entre os eventos ocorridos e a capacidade de previsão do modelo.

5.2.2 – ETAPA 2: Determinação da probabilidade de instabilidade

A avaliação da estabilidade das encostas proposta nesse trabalho fez uso de uma análise em escala regional (Burton e Bathurst, 1998; Dhakal *et al.*, 2004; Saha *et al.*, 2002), ou seja, foi avaliada a condição de estabilidade de toda a bacia hidrográfica selecionada como área de estudo.

Normalmente, a estabilidade da encosta é dependente dos valores de coesão, ângulo de atrito do arranjo de partículas e do nível d’água na massa de solo (se existir). Observa-se que nas encostas de países tropicais, é comum a existência de um perfil de intemperismo sobrejacente a um horizonte de rocha fraturada, que funciona como uma interface drenante, de forma a garantir que a superfície freática se mantenha em níveis profundos (Gerscovich *et al.*, 2015).

Adotando-se a hipótese de que os parâmetros de resistência do solo não variam ao longo do tempo de análise, o gatilho para a instabilidade das encostas é o acréscimo da saturação do solo, o que causa o aumento da poropressão e a conseqüente redução das tensões efetivas na superfície de ruptura (Ray e Smedt, 2009). Assim, eventos de chuvas intensas têm sido considerados como os principais eventos deflagradores de fluxos de detritos (Costa e Fleisher, 1984) e outros movimentos de massa em encostas íngremes de solos residuais (Huat *et al.*, 2006).

Para um dado evento de chuva, a água vai infiltrar no solo e promover um aumento da saturação em zonas próximas à superfície, o que pode causar a ruptura da encosta em eventos prolongados de chuva (Gerscovich *et al.*, 2015; Muntohar e Liao, 2010). Sendo assim, é possível calcular a carga de

Quadro 6 – Avaliação do Mapa de Suscetibilidade (Magalhães, 2021)

Cicatrizes	Suscetibilidade	Avaliação
1	0,999714	Sucesso
2	1,00000	Sucesso
3	0,96724	Sucesso
4	0,99584	Sucesso
5	0,93024	Sucesso
6	0,76466	Falha
7	0,99089	Sucesso
8	0,84737	Sucesso
9	0,93769	Sucesso
10	0,92444	Sucesso
11	1,00000	Sucesso
12	0,90176	Sucesso
13	0,862916	Sucesso
14	0,93780	Sucesso
15	0,75916	Falha
16	0,85920	Sucesso
17	0,99856	Sucesso
18	0,99094	Sucesso
19	0,99812	Sucesso
20	0,98711	Sucesso
21	0,98559	Sucesso
22	0,99340	Sucesso
23	0,84398	Sucesso
24	1,0000	Sucesso
25	0,95966	Sucesso
26	0,99491	Sucesso
27	0,99972	Sucesso
28	0,89453	Sucesso
Nº de sucessos		26
Nº total de cicatrizes		28
Percentagem de sucesso		93%

pressão de água crítica (z_w) que causa a ruptura de uma encosta adotando-se, um valor unitário de FS na formulação matemática do Método do Talude Infinito, e reescrevendo a equação em função de z_w , como mostra a equação seguinte:

$$z_w = \frac{-1}{\gamma_w} \left[\gamma_t * H * \left(\frac{\text{sen}(\alpha) - c'}{\text{tg}(\varphi')} - \cos(\alpha) \right) \right] \quad (3)$$

sendo c' a coesão (kPa); φ' o ângulo de atrito ($^\circ$); γ_t o peso específico do solo saturado (kN/m^3); γ_w o peso específico da água ($9,8 \text{ kN/m}^3$); α a declividade ($^\circ$); z_w a carga de pressão crítica (m) e H a espessura de solo (m).

Com relação à obtenção dos parâmetros necessários para o cálculo de z_w , deve-se observar que a declividade (α) já foi calculada anteriormente no item 5.2.1, sendo obtida a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da região.

O parâmetro seguinte a determinar é a espessura de solo. Como este é um parâmetro de difícil obtenção quando se trabalha com escala regional, em especial com a carência de sondagens, optou-se por usar o modelo proposto por Saulnier *et al.* (1997), que considera que a espessura do solo pode ser calculada em função das profundidades máxima e mínima de solo da região e das altitudes máxima e mínima da área de estudo, segundo a equação seguinte:

$$h_i = h_{max} - \left(\frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \right) * (h_{max} - h_{min}) \quad (4)$$

sendo h_{max} a espessura máxima de solo na região (m); h_{min} a espessura mínima de solo na região (m); z_{max} a elevação máxima na região (m) e z_{min} a elevação mínima na região (m).

Para estimar os valores de h_{max} e h_{min} recorreu-se a valores indicados na literatura. Áreas de grama e arbusto têm limitação na profundidade de penetração das raízes e, portanto, a profundidade média é da ordem de 0,75 m. Áreas de agricultura, de floresta e áreas construídas possuem geralmente uma camada de solo mais espessa, da ordem de 2,00 m (Lee e Park, 2016). Dessa forma, considerou-se $h_{max} = 2,00 \text{ m}$ e $h_{min} = 0,75 \text{ m}$.

Por fim, os dados de coesão, ângulo de atrito e peso específico do solo/rocha foram obtidos em outros estudos realizados sobre o Córrego D'Antas (Pelizoni, 2014; Silva, 2016). Esses dados estão indicados no Quadro 7. A coesão foi considerada nula, correspondente à situação de maior instabilidade. Consideração igualmente conservadora foi também adotada no estudo análise de estabilidade das encostas do Córrego D'Antas apresentado por Silva (2016).

Quadro 7 – Valores de ângulo de atrito e peso específico dos materiais encontrados na bacia do Córrego D'Antas (Pelizoni, 2014; Silva, 2016)

Material	Ângulo de atrito ($^\circ$)	Peso específico (kN/m^3)
Rocha pouco fraturada	35	26
Rocha alterada, granito-gnaiss fraturado	30	22
Solo residual maduro	30	18
Depósito constituído por colúvio e solo residual	25	16

Com o valor de carga de pressão de água crítica (z_w), é possível estimar, utilizando o Método CN, a intensidade de chuva capaz de promover a infiltração necessária para se atingir esse valor de z_w . Esse valor de chuva, por sua vez, está associada a um tempo de recorrência (TR), que é o inverso da sua probabilidade de ocorrência. Dessa forma, a probabilidade de um determinado ponto da área de estudo tornar-se instável depende da probabilidade de ocorrência da chuva que causará essa instabilidade, ou seja, está atrelada a probabilidade de ocorrência do processo deflagrador.

Normalmente, com o Método CN, determina-se as parcelas de abstração (que representa a interceptação da cobertura vegetal e urbana, acúmulo em depressões na superfície, evaporação e demais

tipos de retirada de água do sistema chuva-vazão antes do computo do escoamento superficial direto), infiltração e escoamento superficial para uma dada chuva. Contudo pode-se proceder de maneira inversa e calcular o valor da chuva a partir de um valor de infiltração, com a equação seguinte (SCS, 1964):

$$P = \frac{F * S}{S - F} + 0,2 * S \quad (5)$$

sendo F a retenção atual ou quantidade atual de água infiltrada (mm); S o Valor Potencial Máximo de Retenção de Água no Solo (mm) e P a chuva incidente (mm).

A relação entre chuva e TR é dada por uma curva de Intensidade, Duração e Frequência (IDF) do tipo Otto Pfafstetter (Pfafstetter, 1982), conforme indica a equação:

$$P = TR^{\left(\alpha + \frac{\beta}{TR^\gamma}\right)} * [\alpha * t + b * \log(1 + c * t)] \quad (6)$$

sendo P a altura de chuva (mm); TR a tempo de recorrência (anos); α , β valores que dependem da duração da precipitação (Pfafstetter, 1982); γ , a, b, c parâmetros constantes para cada posto (Pfafstetter, 1982) e t a duração (horas) adotada como sendo igual ao tempo de concentração da bacia (t_c), calculado de acordo com o método de George Ribeiro (Ribeiro, 1961), na equação seguinte:

$$t_c = \frac{16 * L}{(1,05 - 0,2 * p) * (100 * sl)^{0,04}} \quad (7)$$

sendo L o comprimento do rio principal da bacia (km); p a porcentagem da bacia com cobertura vegetal (entre 0 e 1) e sl a declividade média da bacia (m/m).

O produto final desses procedimentos é um mapa que indica a probabilidade de instabilidade de uma encosta dentro da área de estudo (Figura 9a). Confrontando esse mapa com o Mapa de Suscetibilidade, obtido anteriormente na Etapa 1, obtêm-se os locais dentro da área de estudo com

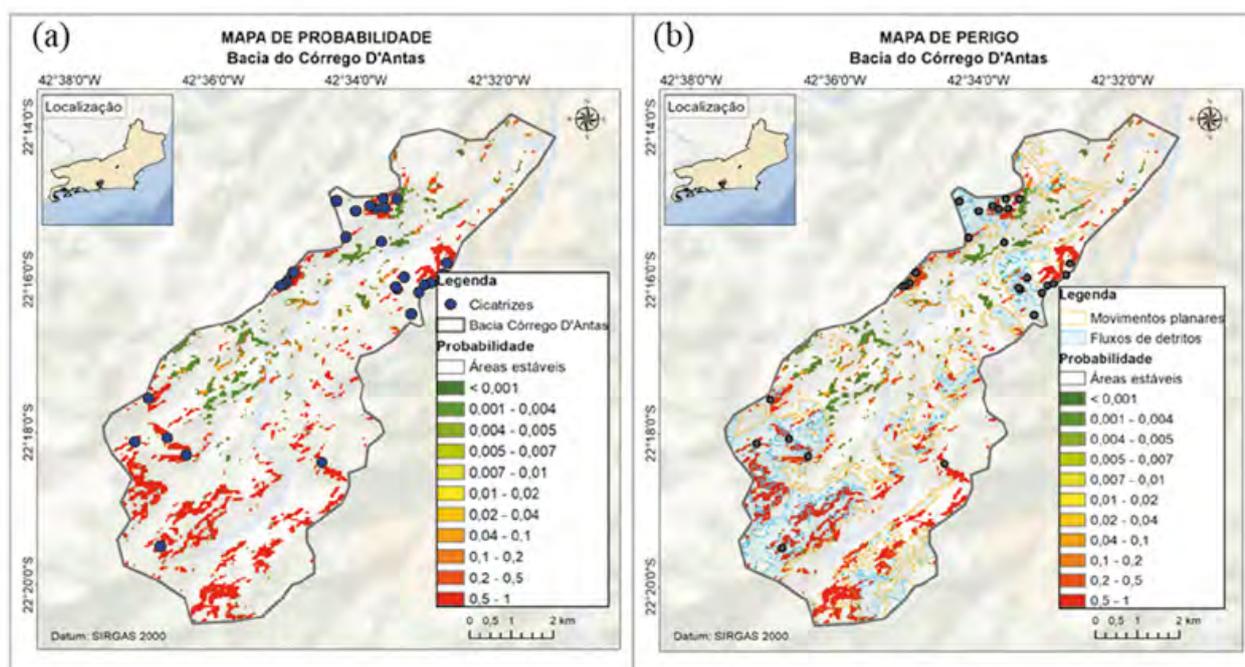


Fig. 9 – (a) Mapa de Probabilidade; (b) Mapa de Perigo (Magalhães, 2021)

as características físicas para gerar um fluxo de detritos e as probabilidades correspondentes desses locais se tornarem instáveis, obtendo-se, assim, o Mapa de Perigo (Figura 9b).

Para fins de avaliação do modelo utilizado, as cicatrizes apresentadas no Mapa de Inventário foram confrontadas com as áreas indicadas pelo Mapa de Probabilidade. Para essa avaliação, extraiu-se o valor de probabilidade da chuva que instabilizaria cada ponto considerado, onde foi registrada uma cicatriz de fluxo de detritos. Os pontos com valor da probabilidade de ocorrência maior ou igual ao valor da probabilidade da chuva ocorrida em janeiro de 2011 (tempo de recorrência de 350 anos) eram computados como

Quadro 8 – Avaliação do Mapa de Probabilidade (Magalhães, 2021)

Cicatrizes	Probabilidade	Avaliação
1	1	Sucesso
2	1	Sucesso
3	1	Sucesso
4	1	Sucesso
5	0,1	Sucesso
6	0,001	Falha
7	0,001	Falha
8	1	Sucesso
9	0,001	Falha
10	0,5	Sucesso
11	0,2	Sucesso
12	0,5	Sucesso
13	0,2	Sucesso
14	1	Sucesso
15	0,2	Sucesso
16	1	Sucesso
17	1	Sucesso
18	0,04	Sucesso
19	1	Sucesso
20	1	Sucesso
21	0,001	Falha
22	0,04	Sucesso
23	0,1	Sucesso
24	1	Sucesso
25	0,2	Sucesso
26	1	Sucesso
27	1	Sucesso
28	0,1	Sucesso
Nº de sucessos		24
Nº total de cicatrizes		28
Percentagem de sucesso		86%

“sucesso”, ou, caso contrário, como “falha” (Quadro 8). O Mapa de Probabilidade apresentou uma percentagem de sucesso de 86%, indicando alta consistência entre os eventos ocorridos e a capacidade de previsão do modelo.

5.3 – Mapa de Vulnerabilidade e Exposição

O Mapa de Vulnerabilidade e Exposição representa o grau de exposição e fragilidade da população dentro da área de estudo, no caso de um evento de fluxo de detritos (Li *et al.*, 2019). A análise adotada possui caráter socioeconômico, e os valores são apresentados em uma escala entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 for esse valor, mais vulnerável e exposto é o elemento.

O cálculo da Vulnerabilidade e Exposição segue a formulação matemática expressa na equação seguinte:

$$VE = \frac{I_E * I_{idade} * I_{alfabetização}}{I_{CR}} \quad (8)$$

sendo VE a Vulnerabilidade e Exposição; I_E o indicador de exposição; I_{idade} o indicador de vulnerabilidade devido à idade dos moradores; $I_{alfabetização}$ o indicador de vulnerabilidade devido ao grau de alfabetização dos moradores e I_{CR} o indicador de capacidade de recuperação no pós desastre.

O indicador de exposição (I_E) representa efetivamente os elementos expostos e foi adotado como sendo a densidade populacional, ou seja, o número de habitantes por quilômetro quadrado.

O indicador de vulnerabilidade devido à idade (I_{idade}) está relacionado com a porcentagem de pessoas mais vulneráveis, considerando a idade. Esse indicador representa, portanto, a porcentagem da população com menos de 10 anos e mais de 65 anos, ou seja, a porcentagem de crianças e idosos (Rezende, 2018).

O indicador de vulnerabilidade devido ao grau de alfabetização ($I_{alfabetização}$) está relacionado com a porcentagem de pessoas mais vulneráveis sob o ponto educacional. Esse indicador representa a porcentagem da população não alfabetizada com mais de 5 anos.

O indicador de capacidade de recuperação (I_{CR}) representa a capacidade de reposição da população afetada. Ele considera a diferença entre a renda e despesa média dos habitantes de uma região, dividida pela renda total dessa região. Assim, esse indicador representa o valor passível de uso para cobertura de danos não previstos, conforme apresentado no Quadro 9 (Rezende, 2018).

Quadro 9 – Capacidade média de recuperação relacionada à faixa de rendimento (Rezende, 2018)

Faixa de rendimento	Faixa de rendimento normalizada por salário mínimo*	CR
Até R\$3000,00	Até 2,7 salários mínimos	0,0000
De R\$3000,00 a R\$4000,00	De 2,7 até 3,6 salários mínimos	0,0420
De R\$4000,00 a R\$6000,00	De 3,6 até 5,5 salários mínimos	0,0768
Maior que R\$6000,00	Maior do que 5,5 salários mínimos	0,1996

* o valor do salário mínimo em 2021 era de R\$ 1.100,00 (ou US\$ 203,4, segundo a cotação do Banco Central do Brasil em 03 de maio de 2021).

Para a determinação da Exposição (I_E) foi utilizada a grade estatística do IBGE, que pode ser observada na Figura 10a. Já para a determinação da Vulnerabilidade (I_{idade} , $I_{alfabetização}$ e I_{CR}) foram usados como unidade de cálculo os setores censitários do IBGE, que representam a menor porção territorial utilizada para planejar e realizar levantamentos de dados do Censo e Pesquisas Estatísticas. Todos os parâmetros necessários para esse cálculo foram provenientes do Censo do IBGE de 2010, sendo esse o mais recente (IBGE, 2010).

As informações de cada setor censitário encontram-se no Quadro 10. Como alguns setores não apresentavam dados de rendimento, optou-se por uma medida conservadora, considerando esses setores com o valor máximo de Vulnerabilidade e Exposição (VE).

O Mapa de Vulnerabilidade e Exposição é obtido, então, pela normalização dos valores adotados para VE. O menor valor de vulnerabilidade receberá valor zero, enquanto os valores maiores que o terceiro quartil da distribuição serão iguais a 1. Todos os demais devem receber um valor entre 0 e 1, segundo uma função linear. O Mapa de Vulnerabilidade e Exposição pode ser visto na Figura 10b.

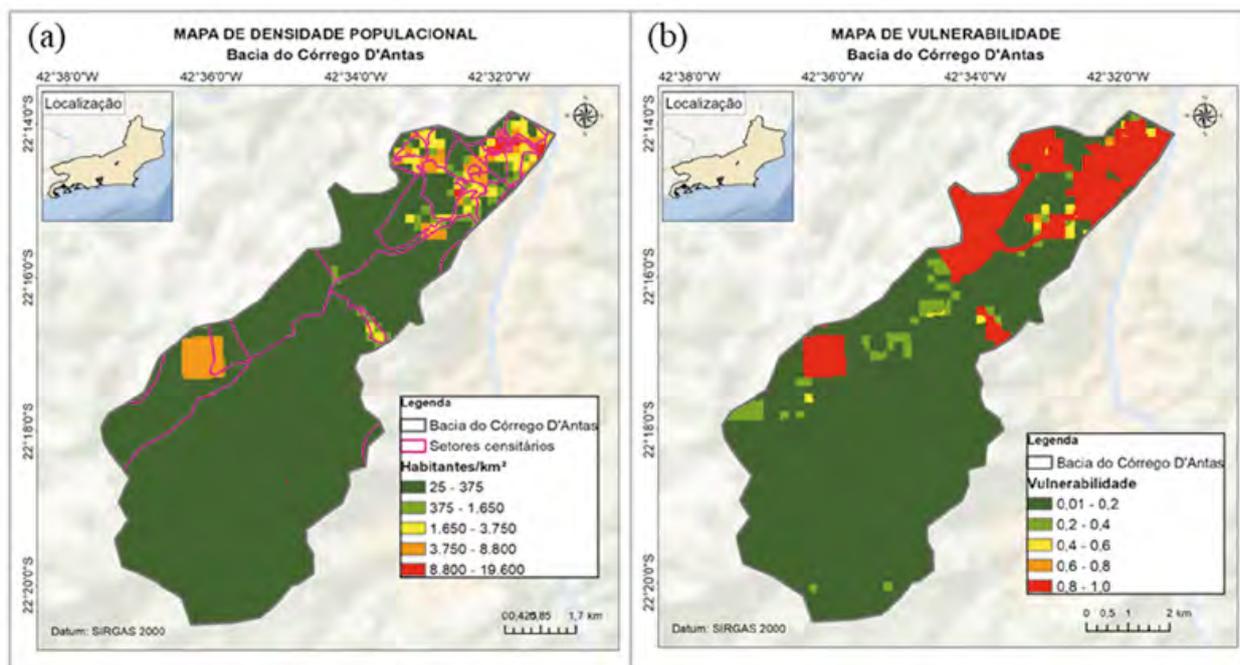


Fig. 10 – (a) Mapa de Densidade Populacional; (b) Mapa de Vulnerabilidade e Exposição (Magalhães, 2021)

Com relação a esse mapa da Figura 10b, observou-se que os indicadores de exposição (I_E) e de capacidade de recuperação (I_{CR}) foram os que apresentaram maior variabilidade dentro da área de estudo e assim, foram os que mais influenciaram o cálculo da “Vulnerabilidade e Exposição”.

Observou-se também que a percentagem de crianças e idosos, e de pessoas não-alfabetizadas variou pouco para essa área de estudo. Dentre os fatores que podem explicar esse comportamento, destacam-se dois, a saber:

- a) o tamanho da área estudada, que pode ser suficientemente pequeno de modo a ser compreendida em uma área relativamente homogênea no município de Nova Friburgo;
- b) boa parte de área estudada apresentava baixa densidade populacional, o que resulta em pouca variabilidade das porcentagens dos grupos vulneráveis.

5.4 – Mapa de Risco

O Mapa de Risco representa a relação entre a probabilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno, e a magnitude de danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado grupo ou comunidade (Bobrowsky e Hervás, 2009). No caso do presente trabalho, o Mapa de Risco apresentado na Figura 11 indica a relação entre a probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos e a magnitude dos danos causados por ele são medidos em termos de consequências sociais e econômicas.

Quadro 10 – Informações de vulnerabilidade e resiliência por setor censitário (Magalhães, 2021)

Código do Setor Censitário	% de não alfabetizados	% de crianças e idosos	Rendimento médio em salários mínimos	CR
330340105000057	11,5%	11,5	4,0	0,0768
330340105000088	14,3%	10,2	-	-
330340105000124	16,4%	10,8	3,4	0,0420
330340105000125	13,5%	12,8	4,9	0,0768
330340105000126	12,8%	10,9	3,6	0,0420
330340105000127	6,3%	10,1	3,7	0,0768
330340105000147	11,9%	9,5	3,5	0,0420
330340105000148	8,2%	11,5	5,2	0,0768
330340105000152	13,8%	12,7	2,9	0,0420
330340105000153	12,9%	10,8	2,9	0,0420
330340105000154	12,4%	10,2	3,4	0,0420
330340105000155	10,0%	10,2	-	-
330340105000156	10,5%	9,3	3,9	0,0768
330340105000157	11,3%	14,0%	2,9	0,0420
330340105000158	15,1%	11,6	3,5	0,0420
330340105000159	11,9%	8,9	-	-
330340105000160	11,0%	9,3	3,3	0,0420
330340105000161	13,8%	10,1	-	-
330340105000189	16,3%	11,8	-	-
330340105000194	11,5%	7,1	-	-
330340105000195	11,9%	9,0	4,3	0,0768
330340105000196	8,3%	13,6	4,3	0,0768
330340105000197	11,9%	12,3	-	-
330340115000004	18,0%	5,8	3,2	0,0420
330340115000006	17,2%	10,0	3,9	0,0768
330340115000007	22,7%	11,9	3,1	0,0420
330340115000008	13,8%	11,0%	2,7	0,0000
330340120000002	10,7%	11,1	3,3	0,0420
330340120000004	9,8%	8,1	3,6	0,0420
330340120000007	11,0%	9,4	-	-
330340120000008	12,3%	10,7	2,9	-
330340120000009	9,9%	11,1	3,1	0,0420
330340120000010	12,8%	10,3	-	-
330340120000011	9,2%	10,7	3,7	0,0768
330340120000012	8,5%	10,8%	8,6	0,1996
330340120000013	11,4%	9,8%	3,9	0,0768
330340120000014	8,2%	10,0%	3,5	0,0420
330340120000015	7,0%	8,1	4,0	0,0768
330340120000016	8,5%	7,7%	3,1	0,0420
330340120000017	11,0%	7,7	3,8	0,0768
330340120000035	12,8%	10,0	-	-
330340120000036	18,1%	12,0	-	-
330340120000043	12,9%	10,3	-	-
330340120000044	12,5%	9,3	3,7	0,0768

Assim, o Mapa de Risco é o resultado do produto dos Mapas de Perigo e Vulnerabilidade e Exposição, segundo a formulação da equação:

$$R = \text{Perigo} * \text{Vulnerabilidade e Exposição} \quad (9)$$

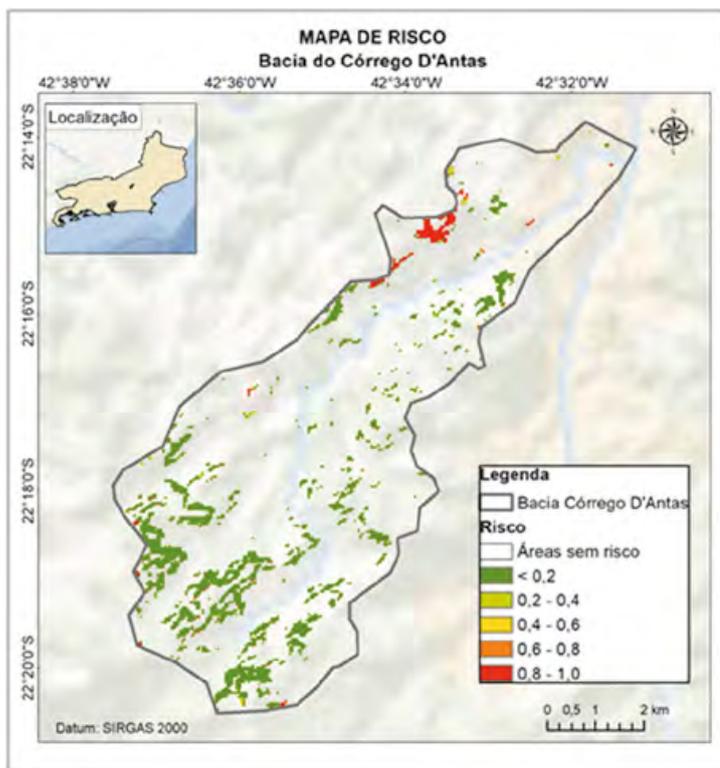


Fig. 11 – Mapa de Risco em Córrego Dantas, Nova Friburgo (Magalhães, 2021)

Os valores desse mapa variam de 0 a 1, em que “zero” significa baixo risco e “um” significa alto risco. Observa-se que em algumas das áreas que apresentavam alto perigo não são computadas como áreas de risco. Isso se deve pela própria definição de risco, onde a sua existência é condicionada não só pela existência do Perigo, que é a sua fonte de origem, como também pela avaliação de como esse evento afeta o sistema considerado. Sem uma dessas parcelas (ou Perigo ou Vulnerabilidade ou Exposição) o risco se anula.

6 – CONCLUSÃO

Esse estudo propôs uma metodologia para o mapeamento de áreas de risco de fluxo de detritos, considerados como um dos acidentes que mais provocam mortes e perdas materiais. Com relação aos resultados obtidos durante a confecção da Etapa 1 do Mapa de Perigo (determinação da suscetibilidade do meio físico) observou-se que 93% das cicatrizes identificadas encontravam-se numa área classificada como “alta suscetibilidade”. Nessa etapa, pretendeu-se determinar quais as combinações de características topográficas, litológicas, de tipo e de uso do solo mais influenciam na formação de fluxos de detritos. Assim, a alta concordância (93%) entre os locais classificados como “alta suscetibilidade” e a efetiva presença de uma cicatriz indicaram que a metodologia proposta respondeu bem ao caso em estudo e que a escolha e a ponderação dessas características refletem bem a realidade.

Já com relação a Etapa 2 do Mapa de Perigo (determinação da probabilidade de instabilidade) observou-se que 86% das cicatrizes identificadas encontravam-se em uma área determinada como instável para uma chuva de TR menor ou igual ao da chuva que ocorreu em janeiro de 2011. Embora a percentagem de assertividade tenha sido ligeiramente inferior (86%) em relação à obtida na Etapa

1, observa-se ainda uma elevada concordância entre os resultados obtidos com a metodologia e os observados em campo.

Nessa etapa, o Método CN foi utilizado como modelo de infiltração. Essa escolha produziu resultados promissores e se deu pelo fato dele ser simples e consagrado na hidrologia, sendo largamente utilizado na maioria dos países. Como estudos de fluxos de detritos estão, em geral, acompanhados de análise hidrológica, utilizar uma metodologia que conecte essas duas análises é muito conveniente.

No que diz respeito ao Mapa de Vulnerabilidade e Exposição, observou-se que os indicadores de exposição (I_E) e de capacidade de recuperação (I_{CR}) foram os que mais influenciaram no cálculo da “Vulnerabilidade e Exposição”, tendo em vista que a percentagem de crianças e idosos, e de pessoas não-alfabetizadas varia pouco no interior da área de estudo. Diversas causas podem explicar esse comportamento, tais como o tamanho reduzido da área estudada, que pode compreender em uma área relativamente homogênea dentro do município de Nova Friburgo, ou o fato de que boa parte de área estudada apresentava baixa densidade populacional, fazendo com que as percentagens dos grupos vulneráveis tenham pouca variabilidade.

Por fim, com relação ao Mapa de Risco, observaram-se resultados bastante coerentes, que ajudaram a validar a aplicação da metodologia no caso em estudo. Percebe-se que muitas das áreas classificadas, ou com alto “Perigo” ou com alta “Vulnerabilidade e Exposição”, não apresentavam alto “Risco”. Isso se deu pela própria definição de risco, pois não havendo concomitância entre o evento perigoso e o grupo que irá sofrer as consequências desse evento, o risco se anula. Dessa forma, o Mapa de Risco, coerentemente, apresenta valores muito mais modestos em relação aos Mapas de Perigo, e Vulnerabilidade e Exposição, uma vez que muitas das áreas classificadas como alto “Perigo” apresentavam baixa “Vulnerabilidade e Exposição” e vice-versa.

Dessa forma, conclui-se que os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, indicando que a metodologia apresentada foi adequada para atingir os objetivos propostos.

7 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao eng. Leonardo de A. Ferreira e à prof. Anna Laura L. S. Nunes pelas sugestões e revisão do presente trabalho e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Brasil) pelo apoio financeiro ao curso de mestrado da primeira autora.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, D. E. (2008). *A brief survey of GIS in mass-movement studies, with reflections on theory and methods*. *Geomorphology*, n. 94, pp. 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.022>
- Alvarado, L. A. S. (2006). *Simulação bidimensional de corridas de detritos usando o Método de Elementos Discretos*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). 152 p.
- ANA (2005). *Hidroweb*. <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em 18 jul. 2021.
- Armas, I.; Vartolomei, F.; Stroia, F.; Bras, L. (2013). *Landslide susceptibility deterministic approach using geographic information systems: application*. *Natural Hazard*, 1(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0857-x>.
- Aron, G.; Lakatos, D. F.; Miller, A. C. (1977). *Infiltration formula based on SCS curve number*. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(1), 419–427.
- Bigarella, J. J. (2003). *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais* (2ª ed.). Editora UFSC, Florianópolis. 1436 p.

- Bobrowsky, P.; Hervás, J. (2009). *Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk*. In K. Sassa & P. Canuti (Eds.), *Landslides - Disaster Risk Reduction* (1^a ed. January 2009, pp. 321–349). Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5>.
- Burrough, P. A.; McDonnell, R. A.; Lloyd, C. D. (2015). *Principles of geographical information system* (3^a ed). Oxford University Press. 333 p.
- Burton, A.; Bathurst, J. C. (1998). *Physically based modeling of shallow landslides sediment yield at catchment scale*. *Environmental Geology*, 35(1), pp. 89–99.
- Canedo, P.; Ehrlich, M.; Lacerda, W. A. (2011). *Chuvas na Região Serrana do Rio de Janeiro: Sugestões para ações de engenharia e planejamento*. Programa de Engenharia Civil. COPPE/UFRJ. 8 p.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Detti, R.; Guzzetti, F.; Pasqui, V.; Reichenbach, P. (1991). *GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(5), pp. 427–445. <https://doi.org/10.1002/esp.3290160505>.
- Coelho Netto, A. L.; Sato, A. M.; Avelar, A. S.; Vianna, L. G. G.; Araújo, I. S.; Ferreira, D.; Lima, P. H. M.; Silva, A. P. A.; Silva, R. P. (2013). *January 2011: The Extreme Landslide Disaster in Brazil*. In C. Margottini, P. Canuti, & K. Sassa (Eds.), *Landslide Science and Practice*. Vol. 6 - Risk Assessment, Management and Mitigation (1^a ed, pp. 377–384), Springer Berlin Heidelberg.
- Costa, J. E.; Fleisher, P. J. (1984). *Developments and Applications in Geomorphology* (1st ed.), Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Cruden, D. M.; Varnes, D. J. (1996). *Landslides types and processes*. In R. L. Schuster & A. K. Turner (Eds.), *Landslides: investigation and mitigation* (pp. 36–75). Transportation Research Board.
- Dhakal, A.; Amada, T.; Aniya, M. (2004). *Landslide mapping and the application of GIS in the Kulekhani watershed, Nepal*. *Mountain Research and Development*, 19(1), pp. 3–16.
- Genovez, A.; Neto, F.; Sartori, A. (2005). *Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(4). <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4>. pp. 5-18
- Gerscovich, D. M. S.; Vargas Jr., E. A.; Campos, T. M. P. (2015). *Estabilidade de taludes*. In Comissão Técnica de Solos Não Saturados. *Solos não saturados no contexto geotécnico* (9^a ed, ABMS, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. pp. 613–632.
- Gong, L.; Tang, C.; Xiong, J.; Li, N. (2020). *Debris Flow Generation Based on Critical Discharge : A Case Study of Xiongmao Catchment , Southwestern China*. *Water (Switzerland)*, 12(552). <https://doi.org/doi:10.3390/w12020552>.
- Hjelmfelt, J. A. T. (1980). *Curve number procedure as infiltration method*. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 106(6), pp. 1107–1111.
- Huat, B. B. K.; Ali, F. H. J.; Low, T. H. (2006). *Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability*. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 1293–1306. <https://doi.org/10.1007/s10706-005-1881-8>.
- Hungr, O.; Morgan, C.; Kellerhals, R. (1984). *Quantitative analysis of debris.torrent hazards for design of remedial measures*, *Canadian Geotechnical Journal*, vol.21, pp. 663-677.

- Hutchinson, J. N. (1988). *Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. General Report, Proceedings, 50th International Symposium on Landslides, 1, pp. 3–35.
- IBGE (2010). *Censo Demográfico 2010*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).
- Kobiyama, M.; Reginatto, G. M. P.; Michel, G. P. (2014). *Contribuição da Engenharia de Sedimentos ao Planejamento Territorial com Ênfase em Redução de Desastres Hidrológicos*. In ENES (Ed.), IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ENES.
- Lee, J. H.; Park, H. J. (2016). *Assessment of shallow landslide susceptibility using the transient infiltration flow model and GIS-based probabilistic approach*. Landslides, 13(5), pp. 885–903. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0646-6>.
- Li, Q.; Lu, Y.; Wang, Y.; Xu, P. (2019). *Debris Flow Risk Assessment Based on a Water – Soil Process Model at the Watershed Scale Under Climate Change: A Case Study in a Debris-Flow-Prone Area of Southwest China*. Sustainability (Switzerland), 11(3199), pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/su11113199>.
- Magalhães, P. M. C. de (2021). *Mapeamento de áreas de risco de fluxo de detritos com base em modelo GIS*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 138 p.
- Medeiros, V. S.; Barros, M. T. L. (2011). *Análise de eventos críticos de precipitação ocorridos na região serrana do Estado do Rio de Janeiro nos dias 11 e 12 de Janeiro de 2011*. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19(1), pp. 10–20.
- Mishra, S. K.; Singh, V. P. (2004). *Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates*. Hydrological Processes, 18(17), pp. 3323–3345.
- Motta, H. P. G. da. (2014). *Avaliação de corridas de detritos para a previsão de eventos futuros*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 263 p.
- Muntohar, A. S.; Liao, H. J. (2010). *Rainfall infiltration: Infinite slope model for landslides triggering by rainstorm*. Natural Hazards, 54(3), 967–984. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9518-5>.
- Nunes, A. L. L. S. (2013). *Convivência Com Rupturas - Barreiras Contra Quedas de Blocos*. COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 1(5), 6ª COBRAE, Conferência Brasileira de Encostas, ABMS, Angra dos Reis, pp. 41-73.
- Nunes, A. L. L. S.; Sayão, A. (2014). *Debris flows e técnicas de mitigação e convivência*. 14º Congresso Nacional de Geotecnia. Covilhã, SPG, Portugal, pp. 83–123.
- Pelizoni, A. (2014). *Análise de fluxos de detritos na região serrana fluminense*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Pfaffstetter, O. (1982). *Chuvas Intensas no Brasil*; 2a. edição. DNOS (BR), Brasil.
- Pinho, G. M.; Francisco, C. N.; Salgado, C. M. (2013). *Análise Espacial dos Movimentos de Massa em Nova Friburgo/RJ: O Caso do Desastre Natural de Janeiro de 2011*. Revista Tamoios, UERJ, 9(1), pp. 16–27. <https://doi.org/10.12957/tamoios.2013.5355>.
- QGIS (2021). *QGIS User Guide*. https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/ Acesso: 18 jul. 2021.
- Ray, R. L.; Smedt, F. (2009). *Slope stability analysis on a regional scale using GIS: a case study from Dhading, Nepal*. Environmental Geology, 1(1), pp. 1603–1611.

<https://doi.org/10.1007/s00254-008-1435-5>.

- Rezende, O. M. (2018). *Análise quantitativa da resiliência a inundações para o Planejamento urbano: caso da bacia do canal do mangue no rio de janeiro*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 282 p.
- Ribeiro, G. (1961). *Acerca do calculo da vazão de obras d'arte : tempo de concentração*. Revista do Clube de Engenharia, 294(1), 16–19.
- Ribeiro, L. B. de F. (2015). *Avaliação do Processo Hidráulico de Ocorrência de Enxurradas e Proposição de um Mapeamento de Áreas de Risco para Apoio ao Planejamento do Uso do Solo*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 298 p.
- Rodine, J. D. (1974). *Analysis of mobilization of debris flows*. PhD. Thesis. Stanford University, USA.
- Saha, A.; Gupta, R.; Arora, M. (2002). *GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas*. Journal of Remote Sensing, 23(2), pp. 357–369.
- Samuels, P.; Gouldby, B. (2009). *Language of Risk – Project Definitions (Second Edition). Integrated Flood Risk. Analysis and Management Methodologies*, FLOODSite. www.floodsite.net Acesso: 05 mar. 2021.
- Saulnier, G.; Beven, K.; Obled, C. (1997). *Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL*. Journal of Hydrology, 202(1–4), pp. 158–172.
- Sayers, P.; Yuanyuan, L.; Galloway, G.; Penning-Roswell, E.; Fuxin, S.; Kang, W.; Ywel, C.; Le Quesne, T. (2013). *Flood Risk Management: A stretegic Approch*. UNESCO. 202 p.
- SCS (1964). *National engineering handbook*. Soil Conservation Service. pp. 255-266.
- Silva, D. T. (2016). *Contribuições sobre Previsão de Fluxo de Detritos*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 125 p.
- Takahashi, T. (2007). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures* (2nd ed.). Taylor & Francis Group. 572 p.
- Telles, W. R.; Rodrigues, P. P. G.; Neto, A. J. S. (2015). *Calibração automática de um simulador aplicado a um rio de montanha empregando dados experimentais de precipitação e nível - Estudo de caso: Córrego D'Antas, RJ*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 21(1), 143–151. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.pp.43-151>.
- UNDRR (2020a). *Human cost of disasters - An overview of the last 20 years 2000-2019* (p. 17). UN Office for Disaster Risk Reduction.
- UNDRR (2020b). *Risks and Disasters - Knowledge Portal*. <http://www.un-spider.org/risks-and-disasters>: Acesso: 29 set. 2020.
- UNISDR (2004). *Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives: Vol. I*. United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR). 11p.
- UNISDR (2009). *Terminology on disaster risk reduction*. United Nations International Risk reduction Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). <https://doi.org/10.1021/cen-v064n005.p003>.
- Valeriano, M. M. (2008). *Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais*. INPE,

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ministério da Ciência e Tecnologia (Brasil), São José dos Campos, SP. 75 p.

- Valverde Sancho, A. M. (2016). *Análise dinâmica de fluxos de detritos em regiões tropicais*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 160 p.
- Ximenes, E. F.; Montezuma, R.; Sato, A. M. (2017). *Gestão participativa de riscos de desastres: o sistema de alerta e alarme de base comunitária do Cardinót, Nova Friburgo, RJ*. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Aplicada I Congresso Nacional de Geografia Física, 16(3), pp. 3904–3916. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2540>.
- Zhang, P.; Ma, J.; Shu, H.; Han, T.; Zhang, Y. (2014). *Simulating debris flow deposition using a two-dimensional finite model and Soil Conservation Service-curve number approach for Hanlin gully of southern Gansu (China)*. Environmental Earth Sciences, 73(10), pp. 6417–6426. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3865-6>.
- Zhou, S.; Warrington, D. N.; Lei, T.; Lei, Q.; Zhang, M. (2014). *Modified CN Method for Small Watershed Infiltration Simulation*. Journal of Hydrology, 4(14), pp. 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001125).
- Zonensein, J. (2007). *Índice de Risco de Cheia como Ferramenta de Gestão de Enchentes*. Dissertação de Mestrado, COPPE/ UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro.