

POTENCIALIDADES DOS LIMIARES DE CHUVA INTENSIDADE-DURAÇÃO NA PREVISÃO DE DESLIZAMENTOS EM JARAGUÁ DO SUL (SC)

Rodrigo Augusto STABILE

Rafael Alexandre Ferreira LUIZ

Andrezza Marques FERREIRA

Harideva Maturano EGAS

Márcio Roberto Magalhães de ANDRADE

RESUMO

Um dos grandes desafios dos sistemas de monitoramento e alerta de desastres naturais é prever em que momento e sob quais condições os deslizamentos ocorrem. Os limiares intensidade-duração, ao utilizar a duração e a intensidade média dos eventos de chuva para estimar quais deles são capazes de deflagrar deslizamentos, têm potencial prático e têm sido extensivamente aplicados mundialmente na análise de deslizamentos deflagrados pela chuva. Conseqüentemente, buscando ampliar as possibilidades de previsão de deslizamentos no Brasil e explorar a boa resolução temporal e espacial das informações de chuva dos pluviômetros do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), esta pesquisa teve como objetivo definir limiares de chuva do tipo intensidade-duração para o município de Jaraguá do Sul (SC). Para isso, foram utilizados dez eventos de chuva com registro de deslizamentos, definidos por chuvas com um intervalo de até 12 h com ausência de precipitação, para os quais foram calculadas a intensidade (I), medida em mm/h, e a duração (D), medida em horas. Para a construção dos limiares os dados de I e D dos eventos de chuva com deslizamentos foram plotados em gráfico log-log e ajustados a partir de uma Função Potência com o mesmo expoente da linha de regressão dos dados. Foi possível elaborar dois limiares de chuva: o Limiar A, que abrange quaisquer ocorrências de deslizamento e o Limiar B, que delimita os eventos de precipitação capazes de deflagrar dez ou mais deslizamentos. Com taxas de acerto médias de até 29,8% e 62,5%, respectivamente, estimou-se que 3,2% dos eventos de chuva ocorridos entre 2016 e maio/2022 estão acima do Limiar A e que 0,4% superam o Limiar B. Os resultados encorajam a expansão de estudos de limiares intensidade-duração para outros municípios e regiões de maneira a aperfeiçoar o potencial de previsão de desastres causados por deslizamentos no território brasileiro.

Palavras-chave: Desastres naturais; Escorregamentos; Movimentos de massa; Eventos extremos; Geografia física.

ABSTRACT

POTENTIALITIES OF INTENSITY-DURATION RAINFALL THRESHOLDS IN THE FORECAST OF LANDSLIDES IN JARAGUÁ DO SUL (SC). One of the great challenges of natural disaster monitoring and early warning systems is to predict when and under what conditions landslides are triggered. Intensity-duration rainfall thresholds use rainfall events' duration and intensity to estimate which of them are capable of triggering landslide and have practical applicability. They have been extensively applied worldwide in analyzing landslides triggered by rain. Thus, seeking to expand the possibilities of forecasting landslides in Brazil and taking advantage of

temporal and spatial resolution of rainfall data of rain gauges from Brazil's National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (Cemaden), this paper aimed to define intensity-duration rainfall thresholds for the municipality of Jaraguá do Sul (Santa Catarina state, Brazil). Ten events with records of landslides were used to calculate rainfall intensity — I (mm/h) and duration — D (h). A rainfall event was defined by rains with an interval of up to 12 hours with no precipitation. Rainfall thresholds were created plotting I and D data in a log-log graph and adjusted using a Power Function with the same exponent as the regression line of the data. Two rainfall thresholds were developed: A, which comprises any landslide occurrences, and B, which embraces rainfall events capable of triggering ten or more landslides. With average success rates of up to 29.8% and 62.5%, respectively, it was estimated that 3.2% of the rainfall events that occurred between 2016 and May 2022 overcame threshold A and that 0.4% overcame threshold B. Results encourage an increase in research on intensity-duration rainfall thresholds in other Brazilian regions in order to improve the capacity of predicting disasters caused by landslides.

Keywords: Natural disasters; Landslides; Mass movements; Extreme events; Physical geography.

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de monitoramento para emissão de alertas de desastres naturais eficaz deve identificar as condições para a deflagração dos processos em tempo real. No caso dos deslizamentos condicionados pela chuva, além de equipamentos para mensuração e estimativa da chuva e modelos de previsão do tempo adequados, um dos grandes desafios está em prever em que momento e sob quais condições as rupturas ocorrem.

Atualmente, os limiares empíricos (GUZZETTI *et al.* 2007, GUZZETTI *et al.* 2008, SAITO *et al.* 2010) são os modelos mais utilizados em sistemas de monitoramento e alerta para prever quais eventos de chuva têm potencial para deflagrar movimentos de massa, especialmente deslizamentos. Para o escopo desta pesquisa, o limiar pode ser definido como a quantidade mínima de chuva para a possível ocorrência de um movimento de massa (deslizamento) em um determinado período (REICHENBACH *et al.* 1998, GUZZETTI *et al.* 2007, SEGONI *et al.* 2018).

Diferentemente dos modelos em bases físicas, que acoplam modelos de estabilidade e hidrológicos para determinar a ocorrência de deslizamentos e, por isso, necessitam de complexos parâmetros de entrada, os limiares empíricos são relativamente simples de serem implementados. Para sua construção são necessárias informações sobre eventos de deslizamento pretéritos e os dados de chuva. Estes últimos podem ser empregados das mais diversas maneiras, fazendo com que diferentes tipos de limiares de chuva sejam utilizados na previsão dos

deslizamentos (ALEOTTI 2004, WIECZOREK & GLADE 2005, GUZZETTI *et al.* 2007, 2008).

Os limiares do tipo intensidade-duração (limiares ID), que utilizam a duração e a intensidade “média” do evento de chuva responsável por rupturas nas encostas, são os mais comuns na literatura internacional (LARSEN & SIMON 1993, WIECZOREK & GLADE 2005, GODT *et al.* 2006, GUZZETTI *et al.* 2007), desde o trabalho pioneiro de CAINE (1980). A principal justificativa geotécnica para o uso e funcionamento deste tipo de limiar é que os deslizamentos (sobretudo os escorregamentos rasos) são comumente deflagrados por eventos de precipitação de forte intensidade (GUIDICINI & IWASA 1977). Estão, portanto, vinculados aos fenômenos instantâneos que detonam os processos de deslizamento, como linhas de fluxos que geram forças de percolação, erosão e saturação do solo em discontinuidades hidráulicas (TATIZANA *et al.* 1987, FERNANDES *et al.* 2001).

No Brasil, porém, desconhecemos estudos de limiares do tipo intensidade-duração para movimentos de massa. Em geral, os limiares de chuva definidos no território brasileiro utilizam acumulados de chuva de 24, 48 ou 72 h (GUIDICINI & IWASA 1977, SANTORO *et al.* 2010, MOLINA *et al.* 2015) ou associações entre a intensidade da chuva (algumas vezes apenas com dados de 24 h) e a chuva antecedente (TATIZANA *et al.* 1987, D'ORSI 2011, D'ORSI *et al.* 2012, MENDES *et al.* 2015, METODIEV *et al.* 2018). De fato, com exceções muito pontuais, o Brasil só passou a ter

um registro sistemático da chuva em escala temporal adequada para este tipo de análise (ex. a cada 10, 15 ou 60 min) a partir da instalação da rede de pluviômetros automáticos do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), iniciada em 2011.

Em vista disso, buscando ampliar as possibilidades de previsão de deslizamentos no Brasil e explorar o potencial das informações de chuva dos pluviômetros do Cemaden, esta pesquisa teve como objetivo definir limiares de chuva do tipo intensidade-duração no município de Jaraguá do Sul (SC).

2 ÁREA DE ESTUDO

O município de Jaraguá do Sul (Figura 1), situado no nordeste de Santa Catarina, possui extensão territorial de 530,894 km² e população estimada em 184.579 habitantes (IBGE 2022).

O substrato do município é formado principalmente pelo *Complexo Luiz Alves*, que inclui gnaiesses granulíticos ortoderivados, de composi-

ção cálcio-alcalina geralmente básica, com porções restritas de formações ferríferas, paragneisses e outros tipos de rochas, e por *Sedimentos Quaternários*, compostos por sedimentos aluvionares-cascalheiras, areias e sedimentos siltico-argilosos. Na porção norte do município, destacam-se os depósitos vulcânico-sedimentares do *Grupo Campo Alegre* e os maciços graníticos da *Suíte Intrusiva da Serra do Mar* (TABALIPA 2019). Acerca da pedologia, verifica-se a predominância de cambissolos do tipo álico, distrófico e húmico álico, bem como de solos podzólicos vermelho-amarelo, latossólicos álicos e podzólicos vermelho-amarelo álicos. A oeste do município identifica-se menor porção de solos do tipo litólicos álicos (TABALIPA 2019).

Em relação aos aspectos geomorfológicos, o município está localizado em área de planície formada na confluência de dois rios (*Itapocu e Jaraguá*), cercado por serras cristalinas subparalelas entre si, com disposição predominante NE-SW, que se iniciam ao sul da *Serra do Mar* e do *Planalto de São Bento do Sul*, margeando todo lado leste do estado de Santa Catarina até a altura do

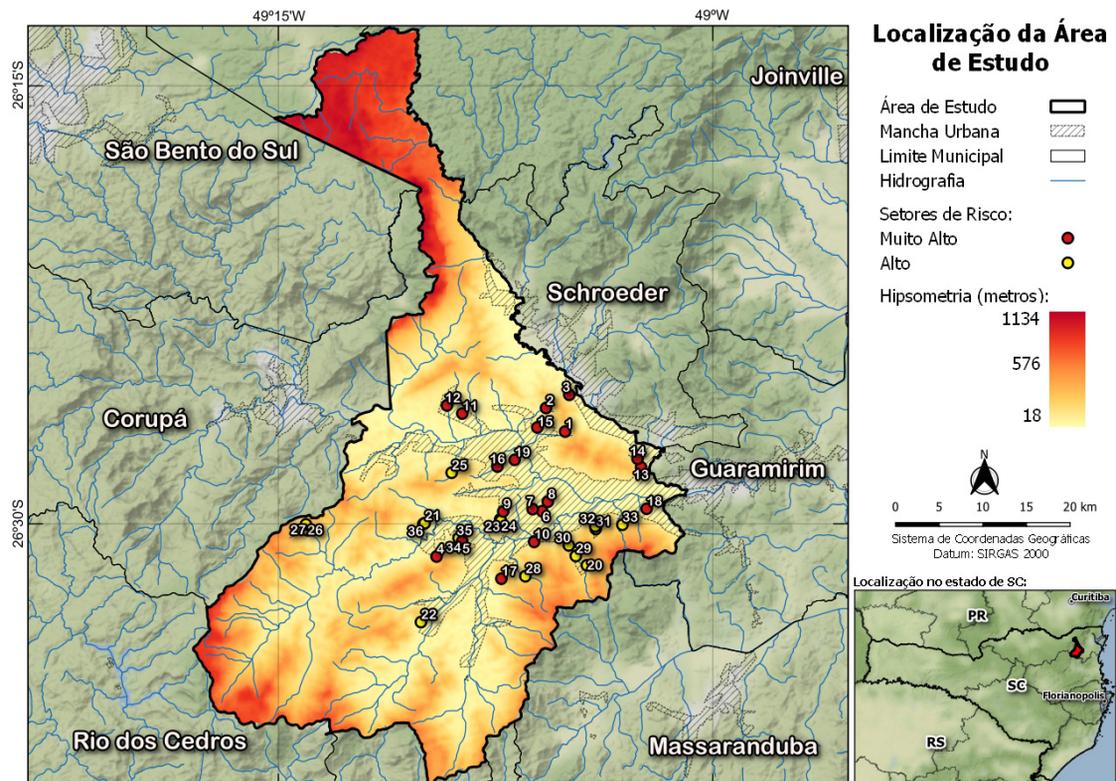


FIGURA 1 – Localização da área de estudo e setorização das áreas de risco. Adaptado de CPRM (2011, 2019).

FIGURE 1 – Location of the study area and sectorization of the risk areas. Adapted from CPRM (2011, 2019).

município de Jaguaruna, no sul catarinense. A geomorfologia regional é caracterizada por vales profundos e encostas íngremes, o que, quando associado à precipitação intensa, favorece a atuação de processos erosivos e inclusive a ocorrência de movimentos de massa (BERTOLI 2006, SANTA CATARINA 2016).

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima de Jaraguá do Sul faz parte do grupo C (mesotérmico), úmido (f) e está incluído no sub-tipo *Cfa*, que caracteriza a região como de clima subtropical, com temperaturas médias no mês mais frio inferior a 18 °C e no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, pouca frequência de geadas e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, porém sem estação seca definida (PANDOLFO *et al.* 2002). De acordo com a figura 2, janeiro é o mês mais chuvoso, com média de 261 mm de precipitação, e o mês menos chuvoso é junho, com média de 102 mm.

São variados os sistemas atmosféricos que atuam na região e influenciam desastres relacionados a deslizamentos, destacando-se: os Sistemas Frontais, que geram instabilidades e produzem muita chuva resultante do encontro de duas massas de ar distintas; os Ciclones extratropicais, cuja convergência de massas de ar devido a sistemas de baixa pressão comuns na costa atlântica catarinense se propagam junto com frentes polares; os Sistemas Convectivos, comuns no verão, com a formação de nuvens profundas; e, os Complexos Convectivos de Mesoescala, com intensidade suficiente para gerar chuvas fortes (KOBAYAMA *et al.* 2006).

2.1 Setores de risco

A tabela 1 apresenta uma síntese dos setores de risco mapeados em Jaraguá do Sul pelo Serviço

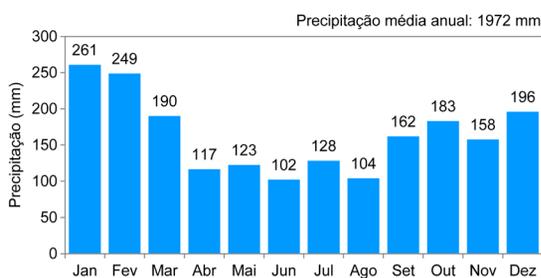


FIGURA 2 – Média da precipitação mensal de Jaraguá do Sul/SC. Fonte: Atlas Pluviométrico do Brasil (PINTO *et al.* 2011).

FIGURE 2 – Average monthly precipitation in Jaraguá do Sul/SC. Source: Pluviometric Atlas of Brazil (PINTO *et al.* 2011).

Geológico do Brasil – CPRM em dois momentos distintos: o primeiro realizado em 2011, e o segundo realizado em 2018, como complemento ao primeiro. Ao analisar a tabela, verifica-se que o município possui 3.184 edificações (nas quais vivem 13.226 pessoas), instaladas em 19 setores classificados como risco muito alto, e 17 classificados como risco alto, todos relacionados a pelo menos um ou mais processos em que ocorrem movimentos de massa (CPRM 2011, 2019).

As áreas mapeadas estão localizadas geralmente na porção basal e média das encostas, locais para os quais a urbanização vem avançando, por vezes de maneira desordenada (Figura 1). Observa-se ainda que o principal fator de risco no município corresponde à ocupação de terrenos desfavoráveis, estando os setores de risco localizados em encostas íngremes associados a taludes de corte, onde geralmente é constatado elevado grau de umidade. De maneira geral, o substrato nestes setores é composto por uma camada fina de solo sobre maciço rochoso (colúvio ou tálus), que podem conter fragmentos de rocha de tamanhos diversos. (CPRM 2011, 2019).

2.2 Histórico de desastres

Devido sua localização, o município de Jaraguá do Sul apresenta suscetibilidade a processos naturais de denudação que, dadas as condições climáticas, geológicas, geomorfológicas e de ocupação antrópica, aumentam a vulnerabilidade e o risco de inundações e movimentos de massa. Os maiores eventos que geraram desastres ocorreram em 2008, 2011 e 2014 (SILVA & PINTO 2013, TABALIPA 2019).

Embora os eventos de 2011 e 2014 tenham resultado em severos danos à população, sobretudo devido aos processos hidrológicos registrados (enxurradas e inundações), os impactos mais significativos associados a movimentos de massa ocorreram nos eventos de 2008 (SILVA & PINTO 2013, TABALIPA 2019). GOUVEIA *et al.* (2018) ressaltam que as condições meteorológicas anômalas observadas no último trimestre de 2008, associadas a um sistema de bloqueio atmosférico, contribuíram para que os maiores volumes de chuva no Sul do país tenham se concentrado no estado de Santa Catarina, principalmente na região litorânea e no Vale do Itajaí, ultrapassando os 1.000 mm de chuva somente no mês de novembro em muitos municípios da região.

O município de Jaraguá do Sul declarou situação de emergência em 20 de novembro de 2008 e, posteriormente Estado de Calamidade Pública em

TABELA 1 – Síntese dos setores de risco em Jaraguá do Sul, SC. Adaptado de CPRM (2011, 2019).

TABLE 1 – Synthesis of the risk sectors in Jaraguá do Sul, SC. Adapted from CPRM (2011, 2019).

<i>N.º do Setor</i>	<i>Tipologia*</i>	<i>Edificações</i>	<i>Pessoas</i>	<i>Grau de Risco</i>	<i>Ano</i>
1	D, C	101	404	Muito Alto	2011
2	D, C	98	320	Muito Alto	2011
3	D, C, I	220	480	Muito Alto	2011
4	D, C, I	162	1198	Muito Alto	2011
5	D, C	246	972	Muito Alto	2011
6	D, C, I	67	268	Muito Alto	2011
7	D, I	144	576	Muito Alto	2011
8	D	25	200	Muito Alto	2011
9	D	46	184	Muito Alto	2011
10	D, Q, C, Ex	195	780	Muito Alto	2011
11	D, I	258	1032	Muito Alto	2011
12	D, I	636	2758	Muito Alto	2011
13	D, Q	61	324	Muito Alto	2011
14	D, Q, C, E	137	548	Muito Alto	2011
15	D, I	177	708	Muito Alto	2011
16	D, E	107	428	Muito Alto	2011
17	D, C, E	55	250	Muito Alto	2011
18	D, E	167	668	Muito Alto	2011
19	D	211	844	Muito Alto	2011
20	D, Ex	11	44	Alto	2018
21	C	5	20	Alto	2018
22	C	6	24	Alto	2018
23	D, Er	5	20	Alto	2018
24	Q	1	4	Alto	2018
25	D	3	12	Alto	2018
26	D, Q	6	24	Alto	2018
27	D, Q	1	4	Alto	2018
28	D	1	4	Alto	2018
29	D, I	4	16	Alto	2018
30	D	3	12	Alto	2018
31	D	2	8	Alto	2018
32	D, Er	1	4	Alto	2018
33	C	2	8	Alto	2018
34	D	2	8	Alto	2018
35	C	3	12	Alto	2018
36	C	15	60	Alto	2018

*D = Deslizamento; C = Corrida de massa, I = Inundação; Q = Queda de bloco;
Ex = Enxurrada; Er = Erosão.

14 de dezembro do mesmo ano. Segundo a defesa civil municipal, entre os meses de novembro e dezembro de 2008 foram registradas 13 vítimas fatais (12 em decorrência de deslizamentos), 147 feridos e 40 famílias desalojadas devido a sucessivos deslizamentos, corridas de massa e inundações decorrentes da elevada e contínua precipitação (SILVA & PINTO 2013).

Sobre este aspecto, SILVA (2014) chama atenção para a insegurança nas áreas de instabilidade natural do município, agravadas pela ocupação irregular de encostas de morros, fundos de vale e

áreas não legalizadas pela administração municipal. Enfatiza ainda que a conformação do relevo de Jaraguá do Sul, com declive acentuado, determina que apenas 42% de sua área total não seja constituída de encostas e que somente 21,3 % de sua área urbana, até meados da década de 90, fossem considerados urbanizáveis. Com o escasso espaço superficial plano e livre de inundações, o município possui forte crescimento populacional e consequente demanda por moradia, o que tem levado à ocupação das encostas tanto pelas classes de baixa como de alta renda (BUTZKE 1995 *apud* SILVA 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Análise dos deslizamentos

Os deslizamentos foram levantados no sistema de Registros de Eventos de Inundação e Deslizamentos do Cemaden (REINDESC), compreendendo eventos de deslizamento ocorridos entre 2016 e maio/2022. Esta base de dados é fomentada pelos especialistas do Cemaden a partir de informações disponibilizadas pelas Defesas Civas, outros sistemas de registro nacionais, assim como por notícias da mídia em geral. Portanto, a qualidade dos dados – localização, data e horário, caracterização geotécnica/hidrográfica e classificação do processo etc. – apresenta variações significativas. Dentre os catorze registros para o município de Jaraguá do Sul, quatro foram

descartados por motivos diversos, entre os quais: processo predominante ser diferente de deslizamento, a chuva não constituir o principal fator deflagrador (ex. deslizamentos em obras ativas com alterações significativas do equilíbrio da encosta), ausência de pluviômetro automático num raio menor que 5 km no caso de eventos com um único deslizamento. O raio de 5 km foi definido empiricamente considerando a variabilidade de um mesmo evento de chuva dentre os diversos pluviômetros utilizados na análise. No caso de deslizamentos múltiplos sem identificação da localização, os eventos foram considerados, uma vez que seria altamente improvável que ao menos um deles não estivesse próximo a um pluviômetro.

Os dez eventos de deslizamento utilizados no estudo (Figura 3 e Tabela 2) constituem, de modo geral, deslizamentos rasos em áreas urbanas e pe-

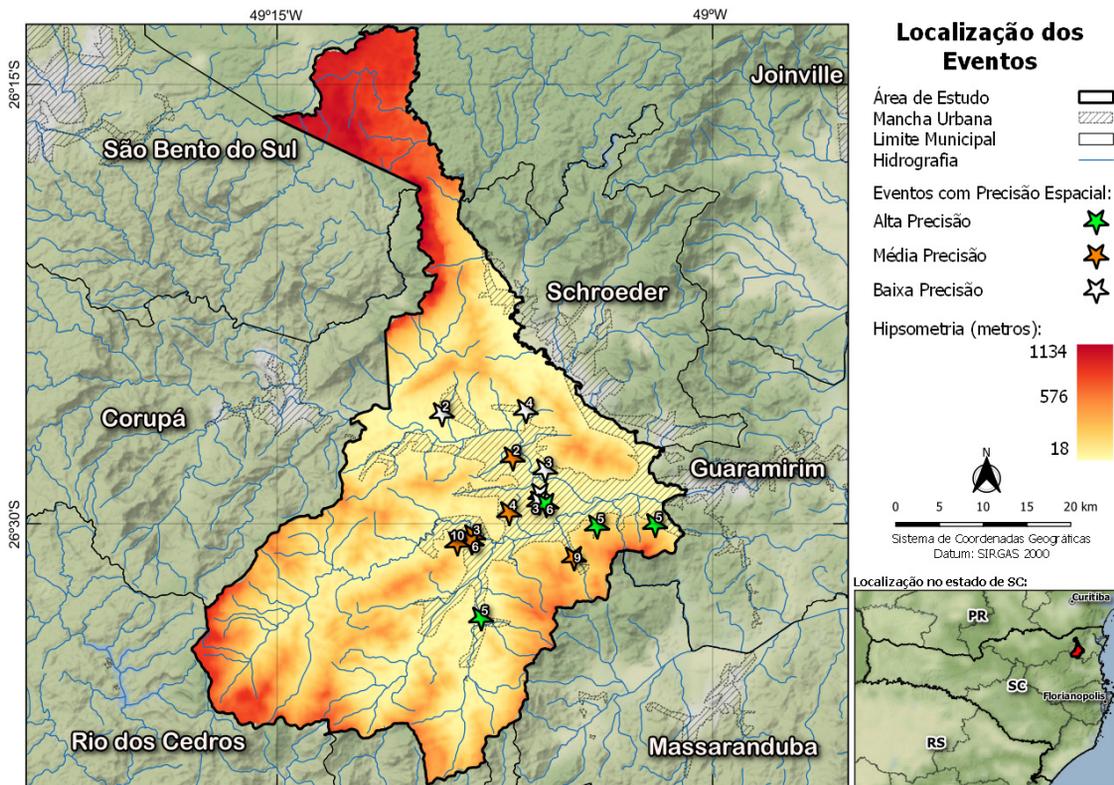


FIGURA 3 – Localização dos eventos com deslizamentos. A classificação dos eventos quanto à precisão espacial segue os seguintes critérios: Ausente - informação fonte faz referência à ocorrência em município sem detalhamento da localização; Baixa - informação fonte refere-se à ocorrência em nível de bairro ou região; Média - informação fonte refere-se à ocorrência em nível de localização ou rua; Alta - informação fonte identifica local específico com possibilidade de identificação de coordenada geográfica. Elaborado pelos autores.

FIGURE 3 – Location of events with landslides. The classification of events in terms of spatial precision follows the criteria: Absent - source information refers to the occurrence in the municipality without detailing the location; Low - source information refers to the occurrence at the neighborhood or region level; Average - source information refers to occurrence at location or street level; High - source information identifies specific location with possibility of geographic coordinate identification. Prepared by the authors.

riurbanas (Figura 4). A maior parte deles têm informações espaciais com precisão de bairro ou região e precisão temporal apenas do período da ocorrência

(madrugada/manhã/tarde/noite). Cabe ressaltar que um dos grandes desafios para a construção de limiares confiáveis é a escassez de informações

TABELA 2 – Eventos com deslizamento em Jaraguá do Sul entre Janeiro/2016 e Maio/2022 utilizados para a elaboração dos limiares.

TABLE 2 – Rainfall events with landslides in Jaraguá do Sul between January/2016 and May/2022 used for the elaboration of the thresholds.

Código	T_i^*	Classificação	Pluviômetro	ΔS (km)*	I (mm/h)*	D (h)*
01	20/02/2016 18:30	1 deslizamento	420890607A	1	14,11	4,17
02	22/12/2018 17:40	1 deslizamento	420890603A	3	5,97	12,00
03	26/05/2017 23:10	2 a 9 deslizamentos	420890605A	1	2,48	39,67
04	19/01/2019 16:00	2 a 9 deslizamentos	420890605A	2,5	8,61	8,50
05	16/02/2019 15:50	2 a 9 deslizamentos	420890602A	3	4,78	42,5
06	30/05/2019 03:20	2 a 9 deslizamentos	420890605A	1,5	2,17	40,83
07	12/12/2020 20:50	2 a 9 deslizamentos	420890603A	N/A	25,53	1,83
08	03/11/2019 19:40	10 ou mais deslizamentos	420890606A	N/A	29,18	3,67
09	18/01/2021 15:10	10 ou mais deslizamentos	420890607A	2	1,88	105,33
10	21/02/2022 18:40	10 ou mais deslizamentos	420890605A	N/A	41,08	2,17

* T_i = início do evento de chuva em que ocorreu o(s) deslizamento(s); ΔS = distância aproximada entre o evento de deslizamento e o pluviômetro (quando não foi possível identificar a localização do deslizamento = N/A); I = intensidade média do evento de chuva (mm/h); D = duração do evento de chuva (h). A definição de evento de chuva e o método para escolha do pluviômetro de referência de cada evento estão no texto.



FIGURA 4 – Deslizamentos registrados em Jaraguá do Sul nos eventos 09 (a) e 05 (b), conforme códigos informados na tabela 1. Fonte: (a) Prefeitura do Município de Jaraguá do Sul, disponível em <https://scc10.com.br/cotidiano/tempo/tres-imoveis-afetados-por-deslizamentos-em-jaragua-do-sul-passam-por-avaliacao-da-defesa-civil/>, acesso em: 02/09/2022; (b) Prefeitura do Município de Jaraguá do Sul, disponível em <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/verao/2019/noticia/2019/02/18/chuva-em-sc-causa-deslizamentos-deixa-familias-desabrigadas-e-vias-interditadas-nesta-segunda-feira.ghtml>, acesso em: 02/09/2022.

FIGURE 4 – Landslides recorded in Jaraguá do Sul in events 09 (a) and 05 (b), according to the codes reported in table 1. Source: (a) Municipality of Jaraguá do Sul, available at <https://scc10.com.br/cotidiano/tempo/tres-imoveis-afetados-por-deslizamentos-em-jaragua-do-sul-passam-por-avaliacao-da-defesa-civil/>, accessed on: 02/09/2022; (b) Municipality of Jaraguá do Sul, available at <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/verao/2019/noticia/2019/02/18/chuva-em-sc-causa-deslizamentos-deixa-familias-desabrigadas-e-vias-interditadas-nesta-segunda-feira.ghtml>, accessed on: 02/09/2022.

satisfatórias (ALEOTTI 2004, GUZZETTI *et al.* 2008), levando em conta ainda que as informações da Defesa Civil e da mídia provavelmente só vão relatar ocorrências com algum tipo de impacto à população e à infraestrutura e não deslizamentos isolados, ou cujo impacto tenha sido imperceptível àquela comunidade.

3.2 Coleta e tratamento dos dados de chuva

O Cemaden tem sete pluviômetros automáticos no município de Jaraguá do Sul (Figura 5), distribuídos de 2 a 6 km entre si e que registram a precipitação a cada 10 min. Por conseguinte, para cada um dos eventos de deslizamento listados foi atribuído um pluviômetro para ser utilizado como referência nos cálculos do evento de chuva deflagrador (Tabela 2). Como regra geral foi utilizado o pluviômetro mais próximo do evento quando sua localização era conhecida. Nos casos de deslizamentos múltiplos com localização conhecida foi escolhido um pluviômetro em um ponto médio entre as ocorrências e nos casos de deslizamentos múltiplos com localização imprecisa foi selecionado o pluviômetro com as maiores intensidades de chuva registradas.

Um dos grandes problemas metodológicos na construção e uso dos limiares ID consiste na definição temporal do evento de chuva deflagrador. A escolha deste parâmetro interfere diretamente nos valores de intensidade (I) e duração (D) dos eventos de chuva analisados. GODT *et al.* (2006), por exemplo, estabeleceram um período com ausência de chuva de pelo menos 3 h para limitar diferentes eventos. SAITO *et al.* (2010) e MATURIDI *et al.* (2021), por outro lado, separaram os eventos de chuva a partir de um período de ausência de chuva de 24 h. No primeiro caso, os autores enfatizaram a intensidade da chuva como parâmetro de análise do limiar ID, mas o associaram a um balanço hídrico para explicar o papel da chuva antecedente nos deslizamentos. Nos últimos, percebeu-se que nas chuvas de longa duração apenas a intensidade média do evento de chuva é considerada, muitas vezes desprezando o papel de picos de chuva intensos na deflagração dos deslizamentos (SAITO *et al.* 2010), em conclusão similar à de GUZZETTI *et al.* (2007), que apontam que a intensidade da chuva mensurada em períodos curtos ou longos tem um significado físico diferente. Neste estudo, após a análise do comportamento de alguns even-

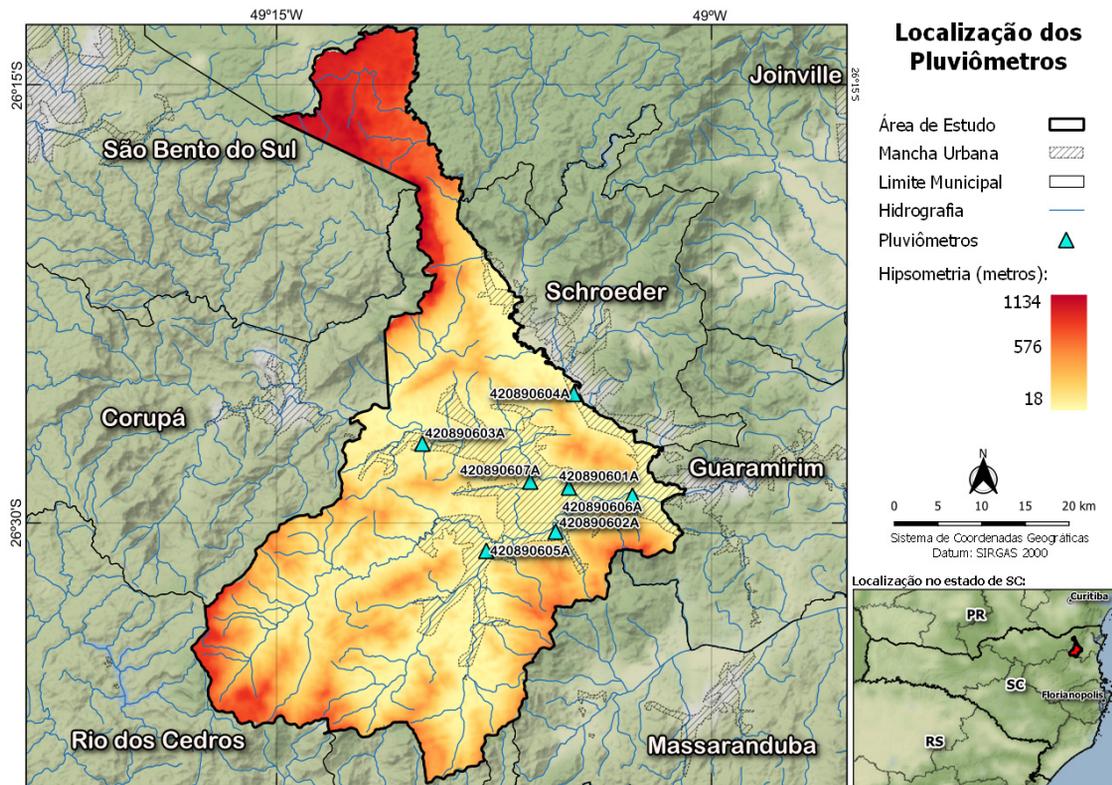


FIGURA 5 – Localização dos pluviômetros do Cemaden. Elaborado pelos autores.

FIGURE 5 – Location of Cemaden rain gauges. Prepared by the authors.

tos de chuva e levando em conta os estudos citados, decidiu-se definir o evento de chuva a partir da ausência de chuva por um período de pelo menos 12 h (antes ou depois do evento).

A intensidade (I), medida em mm/h, e a duração (D), medida em horas, foram então estabelecidas para cada um dos eventos de chuva com deslizamento. A figura 6 ilustra três eventos de chuva utilizados neste estudo. A partir deles fica nítida a problemática da definição do evento de chuva: nas figuras 6b e 6c um mesmo evento tem vários picos de intensidade com períodos de ausência de chuva ou chuva fraca, de modo que uma especificação diversa para o evento de chuva resultaria em valores de I e D diferentes.

Cabe notar que mesmo nos casos em que o horário aproximado da ocorrência de deslizamento era conhecida, sendo estas exceções à precisão temporal geral, foram utilizados os valores de I e D do evento de chuva como um todo, ou seja, mesmo após a virtual ocorrência do deslizamento. O uso da intensidade média e da duração do evento de chuva na sua totalidade é o método mais difundido na aplicação de limiares intensidade-duração (GUZZETTI *et al.* 2007, 2008), e difere de métodos que consideram o horário preciso dos deslizamentos para calcular a chuva deflagradora (ex. ALEOTTI 2004). Há duas justificativas principais para esta escolha. A primeira baseia-se na baixa precisão dos registros de deslizamento,

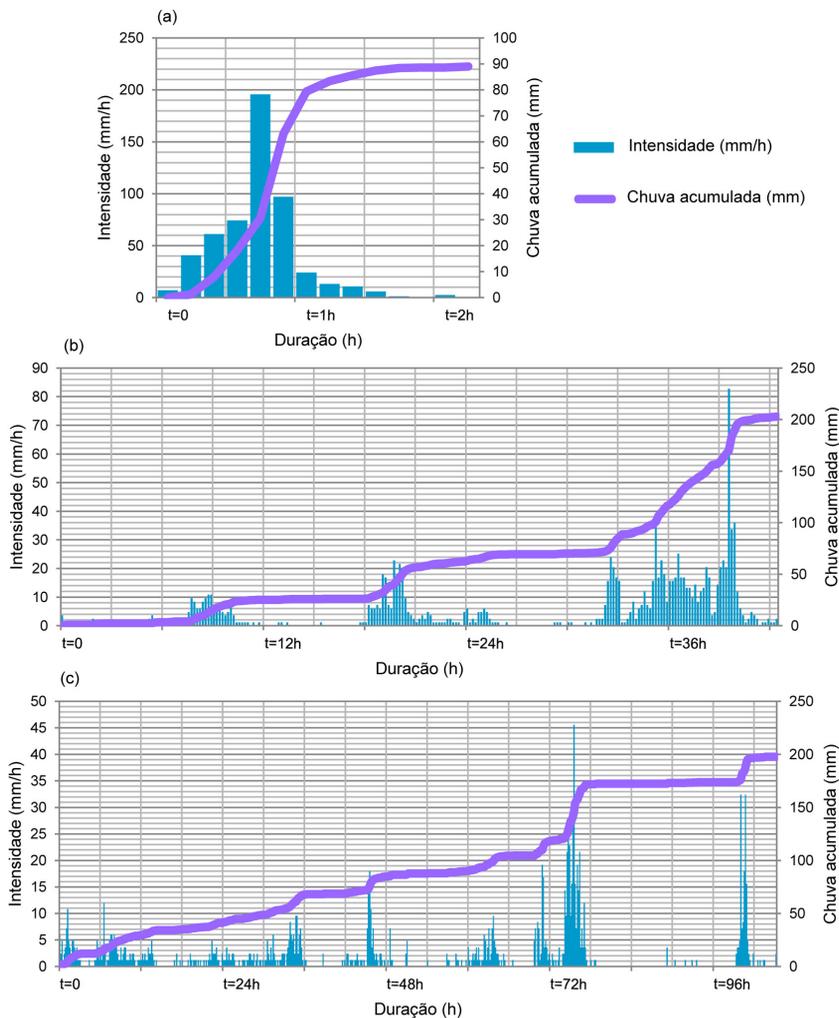


FIGURA 6 – Gráficos representando três eventos de chuva, códigos 10 (a), 09 (b) e 05 (c) conforme a tabela 2. Cada barra azul representa a intensidade da chuva (mm/h) em um período de 10 min tal como mensurado pelo pluviômetro automático.

FIGURE 6 – Graphs representing three rain events, codes 10 (a), 09 (b) and 05 (c) as shown in table 2. Each blue bar represents the intensity of rain (mm/h) over a 10-minute period as measured by the automatic rain gauge.

de modo que o uso do horário do deslizamento na análise seria impossível na maioria dos casos e provavelmente adicionaria erros aos registros de intensidade e duração da chuva. A segunda advém da possibilidade de comparação com os eventos de chuva que não geram deslizamentos.

4 LIMIARES INTENSIDADE-DURAÇÃO

Os limiares Intensidade-Duração (ID) são normalmente representados por uma Função Potência na seguinte forma (Equação 1):

$$I = \alpha D^{\beta} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: I é a intensidade (média) da chuva (mm/h), D é a duração da chuva (h), enquanto α e β são parâmetros da equação.

Para a construção dos limiares de Jaraguá do Sul os dados de I e D dos eventos de chuva com deslizamentos (Tabela 2) foram plotados em um gráfico log-log. A distribuição dos pontos mostrou uma clara correlação negativa entre I e D (Figura 7), levando à interpretação de que chuvas mais intensas necessitam de menos tempo para deflagrar deslizamentos.

Após o ajuste da linha de regressão dos dados na forma de uma função potência, o limiar foi estabelecido no limite inferior de todos os eventos com

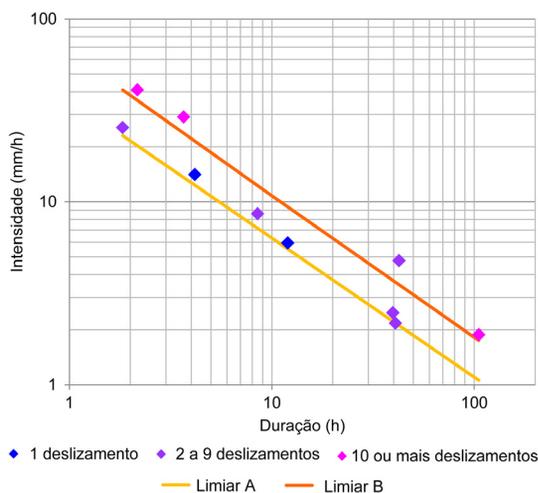


FIGURA 7 – Gráfico log-log com a intensidade (eixo vertical) e duração (eixo horizontal) dos eventos de chuva com deslizamento(s) e os limiares A e B (método de elaboração no texto).

FIGURE 7 – Log-log graph with intensity (vertical axis) and duration (horizontal axis) of rainfall events with landslide(s) and thresholds A and B (method of elaboration in the text).

deslizamento com o mesmo expoente β da linha de regressão. Foi possível elaborar dois limiares de chuva para o município de Jaraguá do Sul. O Limiar A (Equação 2) abrange quaisquer ocorrências de deslizamento, enquanto o Limiar B (Equação 3) delimita os eventos de precipitação capazes de deflagrar dez ou mais deslizamentos. Nota-se que não há diferença visível da relação entre I e D entre aqueles eventos com apenas um deslizamento e aqueles que compreendem de dois a nove deslizamentos.

$$I = 36,456D^{-0,76} \quad (1,83 < D < 105,3) \quad (\text{Equação 2})$$

$$I = 64,816D^{-0,76} \quad (1,83 < D < 105,3) \quad (\text{Equação 3})$$

Estes limiares delimitam eventos com $1,83 < D < 105,33$ e I variando entre 1,88 e 41,08 mm/h. O Limiar B, particularmente, foi sistematizado a partir de apenas três eventos com durações curtas ou muito longas, sem dados intermediários, devendo ser observado com cautela.

Alguns estudos (GUZZETTI *et al.* 2007, SAITO *et al.* 2010) têm apontado que os mecanismos para deflagração de deslizamentos nas chuvas de forte intensidade e curta duração provavelmente não são exatamente os mesmos das chuvas mais longas e de menor intensidade. Por outro lado, os dados da figura 6 sugerem que mesmo em chuvas de longa duração há picos de alta intensidade de chuva que podem estar também associados à deflagração de deslizamentos, denotando que as ocorrências precisam de um gatilho, mesmo com altos volumes de chuva antecedente.

Efetivamente, mesmo que os deslizamentos sejam deflagrados pela água que imediatamente infiltra na encosta e gera forças de percolação, erosão e saturação do solo (TATIZANA *et al.* 1987, FERNANDES *et al.* 2001), sabe-se que a precipitação antecedente atua na redução da resistência ao cisalhamento (GUIDICINI & IWASA 1977, TATIZANA *et al.* 1987) e favorece a percolação da água no solo devido à condutividade hidráulica na condição saturada (GUIDICINI & IWASA 1977, WOLLE & CARVALHO 1989, ALEOTTI 2004, GODT *et al.* 2006).

4.1 Parâmetros α e β e comparação com outros limiares

Os limiares estabelecidos neste estudo parecem ter parâmetro α relativamente alto ($\alpha=36,456$ para o Limiar A e $\alpha=64,816$ para o Limiar B) em comparação com outros estudos (Figura 8). Ainda que não seja totalmente adequado interpretá-lo isoladamente (sem β), dentre os limiares apre-

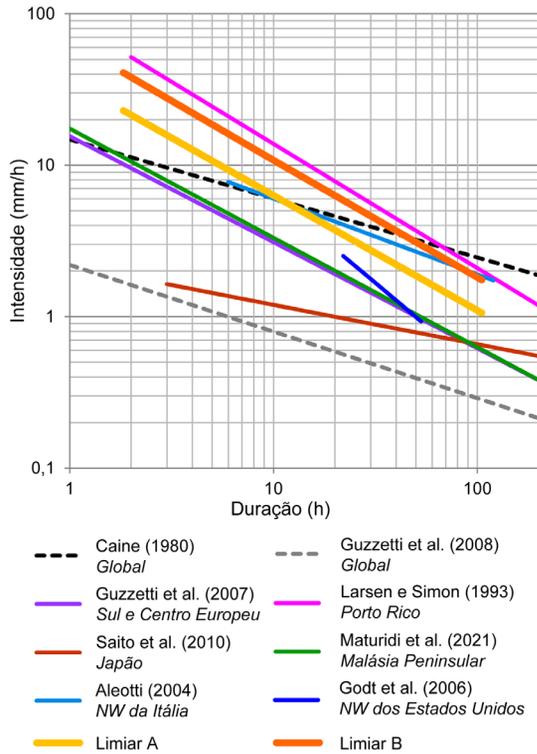


FIGURA 8 – Comparação dos limiares A e B com outros limiares intensidade-duração publicados.

FIGURE 8 – Comparison of thresholds A and B with other published intensity-duration thresholds.

sentados na figura 8, apenas os limiares definidos por LARSEN & SIMON (1993) para Porto Rico ($\alpha=91,46$) e GODT *et al.* (2006) no NW dos Estados Unidos ($\alpha=82,73$) apresentam um parâmetro α maior. Cabe ressaltar que na pesquisa de LARSEN & SIMON (1993), os autores utilizaram eventos com dezenas a centenas de escorregamentos, enquanto GODT *et al.* (2006) utilizaram eventos com um período de duração restrito (entre 23 e 46 h).

Em geral, percebe-se que os limiares globais ou definidos para áreas muito grandes (ex. SAITO *et al.* 2010, cujo limiar abrange todo o território japonês) têm um parâmetro α bastante menor. O limiar global definido por GUZZETTI *et al.* (2008), por exemplo, teria pouco efeito prático na previsão de deslizamentos em Jaraguá do Sul, uma vez que ele abrangeria boa parte dos eventos de chuva registrados nos pluviômetros.

Neste sentido, chama a atenção o limiar global inicialmente proposto por CAINE (1980), onde $\alpha=14,82$, porém, $\beta=-0,39$, de modo que para chuvas de maior duração ($D>12h$), seu limiar acaba sendo mais restrito do que aqueles aqui propostos.

Acreditamos que as explicações para este resultado inusitado baseiem-se em diferenças metodológicas na definição do evento de chuva, mas, principalmente na forma de coleta dos dados, uma vez que o autor utilizou dados de outros trabalhos publicados internacionalmente que provavelmente relatavam eventos de grande magnitude relativa.

O expoente $\beta=-0,76$ nesta pesquisa assemelha-se ao de outros estudos realizados em áreas tropicais ($\beta=-0,82$ em Porto Rico e $\beta=-0,722$ na Malásia Peninsular), bem como a estudos regionais que utilizaram eventos com períodos de tempo amplos ($\beta=-0,7$ para o sul e centro europeu). Valores maiores de β : $-0,39$ em CAINE (1980), $-0,44$ em GUZZETTI *et al.* (2008) e $-0,26$ em SAITO *et al.* (2010), foram encontrados em estudos globais ou em áreas muito amplas e com grande variação ambiental, onde os dados utilizados para a construção dos limiares normalmente têm uma maior dispersão. Valores muito menores: $\beta=-1,13$ em GODT *et al.* (2006) podem estar associados aos eventos com amplitude de duração restrita utilizados por estes autores. Outra explicação para estas variações poderia estar na própria escolha do método de definição das curvas (neste estudo utilizamos o mesmo expoente da linha de regressão), mas as pesquisas de GUZZETTI *et al.* (2007, 2008) empregaram a mesma técnica de estatística Bayesiana e encontraram valores bastante diferentes de β , refutando, a princípio, esta suposição.

Assim, $\beta \sim 0,7$ ou $0,8$ parece ser um valor típico em limiares de chuva intensidade-duração para deslizamentos, quando o horizonte temporal dos eventos é suficientemente extenso e quando são utilizados dados de uma região com relativa homogeneidade geográfica, mas esta conjectura só pode ser confirmada a partir da análise de outros limiares no Brasil e no mundo.

5 TAXAS DE ACERTO

Considerando que os limiares foram definidos apenas a partir de eventos com deslizamentos e objetivando seu uso prático (por exemplo, na emissão de alertas de desastres naturais), interessou-nos saber qual seria a sua representatividade em relação aos eventos de chuva registrados em Jaraguá do Sul. Para fins metodológicos, todos os eventos de chuva em que não constam registros de deslizamentos no sistema de Registros de Eventos de Inundação e Deslizamentos do Cemaden (REINDESC) foram considerados eventos com ausência de deslizamentos.

Calculamos os eventos de chuva acima dos limiares estabelecidos para cada um dos pluviômetros de Jaraguá do Sul (Tabela 3) e, em seguida, avaliamos uma taxa de acerto, conforme a equação 4.

$$TA (\%) = \frac{E_{\text{limiar;deslizamento}}}{E_{\text{limiar}}} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: TA (%) é a taxa de acerto do limiar naquele pluviômetro; E_{limiar} é o total de eventos acima do limiar registrados no pluviômetro; $E_{\text{limiar;deslizamento}}$ é o total de eventos acima do limiar no pluviômetro e com registro de deslizamentos (ou da quantidade de deslizamentos prevista pelo limiar).

Cabe notar que, uma vez que no nosso estudo o cálculo da intensidade (I) e da duração (D) dos eventos com deslizamento utilizou um pluviômetro de referência para cada um dos eventos, é possível que um evento com deslizamento esteja abaixo do limiar em pluviômetros diferentes daquele, principalmente quando eles estão mais distantes (Figura 9). Assim, o mesmo evento de chuva que causou o(s) deslizamento(s) pode ter valores de precipitação menores ou estar registrado em outro horário em pluviômetros diferentes, devido ao deslocamento e à dinâmica da tempestade.

Sobre a frequência da ocorrência de eventos acima dos limiares (Tabela 3), nota-se que eventos acima do Limiar A representam entre 2,6% e 3,6% do total de eventos ($\bar{X}=3,2\%$) e que eventos acima do Limiar B constituem entre 0,1 e 0,9 ($\bar{X}=0,4\%$) do total de eventos de chuva registrados. As taxas de acerto variam entre 12,5% e 33,3% ($\bar{X}=25,5\%$)

para o Limiar A e entre 0% e 100% ($\bar{X}=35\%$) para o Limiar B.

Os pluviômetros 04A e 06A (Figura 5), situados mais a leste do município, apresentam taxas de acerto notadamente mais baixas. Acreditamos que isto ocorra por estarem mais distantes da maioria dos deslizamentos registrados no município, bem como por representarem muitas vezes um momento diferente da chuva daqueles pluviômetros situados mais a montante, entre as serras e morros do vale do rio Itapocu. Já o pluviômetro 02A tem uma taxa de acerto particularmente baixa para o Limiar B. A explicação sustenta-se no fato deste pluviômetro ter seu funcionamento suspenso em meados de 2019, antes que dois dos três registros de eventos com dez ou mais deslizamentos em Jaraguá do Sul tivessem ocorrido. Efetivamente, quando excluimos os pluviômetros 04A e 06A dos cálculos de taxa de acerto do Limiar A e excluimos os pluviômetros 02A, 04A e 06A dos cálculos de taxa de acerto do Limiar B, as taxas médias aumentam para 29,8% no Limiar A e 62,5% no Limiar B.

5.1 Considerações sobre a intensidade e os acumulados prévios de chuva

A observação da figura 9 nos permite verificar também que os eventos de chuva acima do Limiar A e sem registros de deslizamentos se concentram tanto nos eventos de curta duração (até 6 h), como nos eventos de chuva de longa duração

TABELA 3 – Taxas de acerto dos limiares de chuva.

TABLE 3 – Success rates of the rainfall thresholds.

Pluviômetro*		01A	02A	03A	04A	05A	06A	07A
Limiar A	E_{limiar}	18 (2,6%)	13 (3,4%)	21 (3,6%)	24 (3,3%)	21 (2,9%)	27 (3,9%)	21 (2,9%)
	$E_{\text{limiar;deslizamento}}^{**}$	5	4	6	3	7	6	6
	TA	27,8%	30,8%	28,6%	12,5%	33,3%	22,2%	28,6%
Limiar B	E_{limiar}	2 (0,3%)	2 (0,5%)	2 (0,3%)	4 (0,5%)	1 (0,1%)	6 (0,9%)	3 (0,4%)
	$E_{\text{limiar;deslizamento}}^{**}$	1	0	1	1	1	1	2
	TA	50%	0%	50%	25%	100%	16,7%	66,7%
Total de eventos		684	380	582	728	734	699	722

* Os códigos dos pluviômetros foram resumidos, todos eles são precedidos pela sequência “4208906”.

** Para o cálculo de $E_{\text{limiar;deslizamento}}$ do Limiar A foram utilizados todos os eventos com deslizamento e acima do limiar, enquanto para o Limiar B foram utilizados apenas os eventos com dez ou mais deslizamentos e acima do limiar.

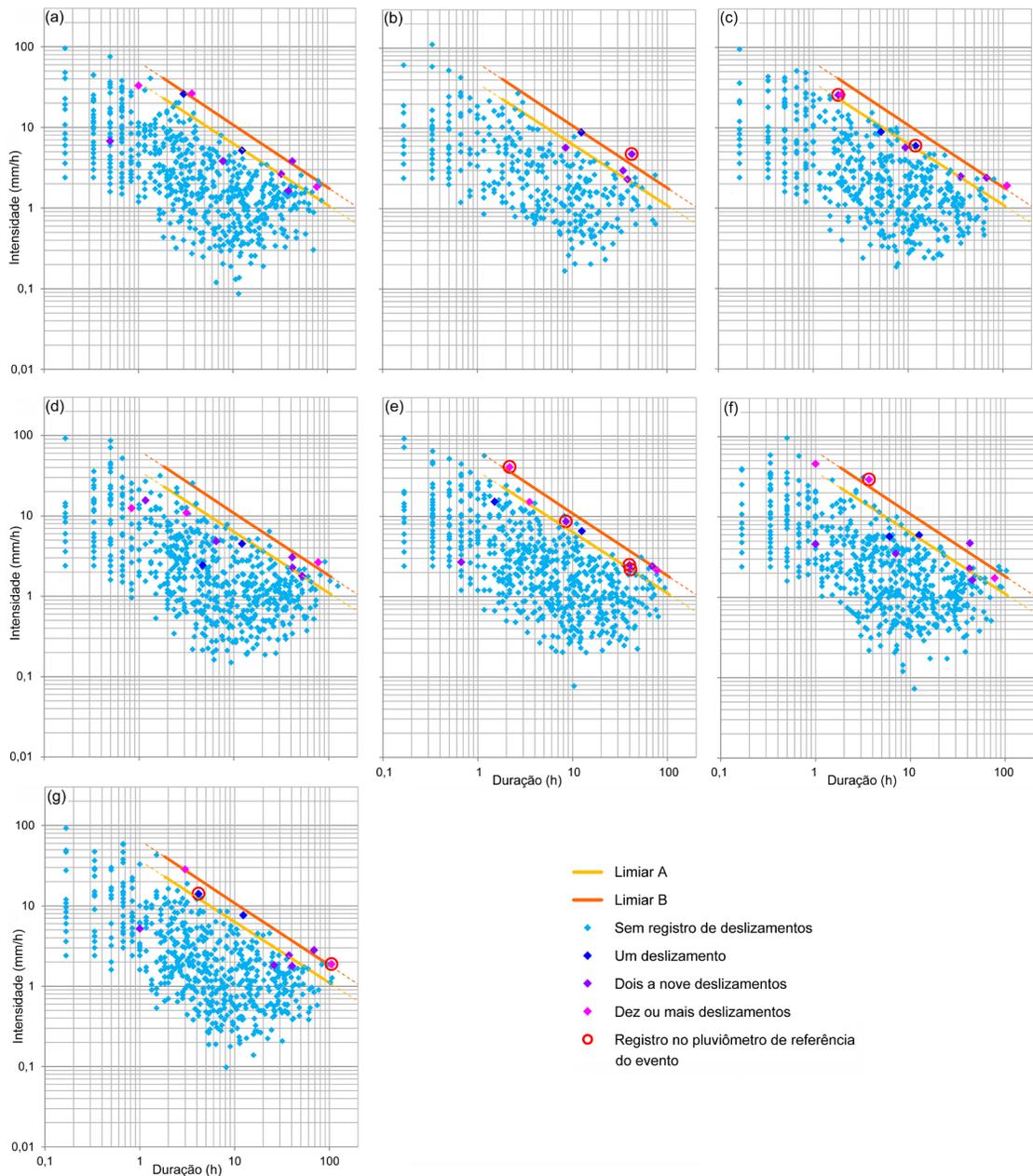


FIGURA 9 – Eventos de chuva registrados em cada um dos pluviômetros, com destaque para os eventos com ocorrência de deslizamentos. Pode acontecer de eventos com deslizamentos estarem plotados abaixo dos limiares por não ser o seu pluviômetro de referência. Os eventos com ocorrência no pluviômetro de referência são aqueles em que os dados de I e D utilizados para a construção dos limiares foram coletados naquele pluviômetro e estão destacados. Código dos pluviômetros representados em cada gráfico: (a) 420890601A, (b) 420890602A, (c) 420890603A, (d) 420890604A, (e) 420890605A, (f) 420890606A, (g) 420890607A.

FIGURE 9 – Rain events recorded in each of the pluviometers, highlighting the events with landslide occurrences. It may happen that events with landslides are plotted below the thresholds because it is not their reference rain gauge. The events with landslide occurrence in the reference rain gauge are those in which the I and D data used to build the thresholds were collected in that rain gauge and are highlighted. Code of the rain gauges represented in each graph: (a) 420890601A, (b) 420890602A, (c) 420890603A, (d) 420890604A, (e) 420890605A, (f) 420890606A, (g) 420890607A.

(acima de 24 h). Sabe-se que os limiaries inevitavelmente representam uma simplificação da relação entre a chuva e a deflagração de movimentos de massa (ALEOTTI 2004), de modo que não sendo a chuva a causa direta das rupturas e sim a infiltração da água na encosta e todos os mecanismos geotécnicos envolvidos, a ocorrência de deslizamentos irá variar também em função de outros fatores controladores como as propriedades hidrológicas e físicas do solo, a geomorfologia do terreno, a estrutura geológica, a cobertura vegetal, assim como as interferências antrópicas. Estas últimas, no caso de deslizamentos isolados reportados pelas Defesas Civis, certamente têm influência muito grande na instabilização das encostas.

Certamente esta justificativa associada à subnotificação de ocorrências explica parte dos eventos de chuva acima dos limiaries e sem deslizamentos. Contudo, interessou-nos saber se outros aspectos da chuva, particularmente os picos de intensidade e os acumulados prévios, não poderiam esclarecer por que alguns eventos de chuva acima dos limiaries não foram capazes de deflagrar deslizamentos. Para isso foi calculada a intensidade máxima da chuva (em 10 min e em 1 h) de cada um dos eventos de chuva acima dos limiaries (Figura 10a 10b) e o acumulado de chuva em até 96 h antes do evento considerado (Figura 10c e 10d).

As figuras 10a e 10b sugerem que nos eventos de chuva com duração acima de 24 h, os picos de intensidade parecem ter tido alguma importância na deflagração de deslizamentos. Verifica-se que 80% destes eventos de chuva com deslizamentos tiveram um pico de chuva de pelo menos ~40 mm/h em 10 min e ~20 mm/h em 1h. Da mesma forma, 80% dos eventos de chuva com $D > 24h$ e sem deslizamentos têm picos de chuva abaixo destes valores.

De fato, estes resultados corroboram as análises de GUIDICINI & IWASA (1977) e TATIZANA *et al.* (1987) de que os escorregamentos rasos são deflagrados por processos geomecânicos relacionados aos eventos de precipitação de forte intensidade. Mesmo eventos de precipitação que geram altos acumulados, especialmente acima de 24 h, precisam de picos de chuva intensa para deflagrar deslizamentos, ainda que menores do que os picos de chuva que instabilizam as encostas em eventos de menor duração.

Por outro lado, as figuras 10c e 10d não apresentam dados consistentes com qualquer conclusão a respeito dos acumulados prévios. Consequentemente,

os principais indutores dos deslizamentos registrados entre 2016 e maio/2022 em Jaraguá do Sul são os próprios eventos de chuva deflagradores.

6 POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE ALERTA

Os limiaries intensidade-duração trazem novas perspectivas quanto às possibilidades de emissão de alertas de deslizamentos no território brasileiro. Diferentemente dos limiaries tradicionalmente utilizados que empregam acumulados de chuva em 24, 48 ou 72 h, os limiaries intensidade-duração são capazes de prever os eventos de chuva de curta duração que potencialmente podem deflagrar deslizamentos.

Contudo, no caso do uso desses limiaries em um sistema de alertas, há de se ponderar um número considerável de eventos falsos positivos, sobretudo para o Limiar A. Isso pode ocorrer, nas taxas aqui reportadas, pela subnotificação das ocorrências de deslizamento pelos motivos já descritos no item 3.1, mas também pelos limiaries de chuva tratem-se de modelos simples de uma realidade amplamente complexa. Por isso, um sistema de alertas deve envolver necessariamente a conscientização da população não só acerca dos riscos (INTRIERI *et al.* 2013, WMO 2018), mas também das limitações metodológicas na previsão dos fenômenos.

A UNDRR (2015) define que um sistema de alerta corresponde a um sistema integrado de monitoramento de perigos, previsão e predição, avaliação de risco de desastres, assim como a sistemas para comunicação e preparação que permitem que indivíduos, comunidades, governos, empresas e outros tomem medidas para reduzir os riscos de desastres antes da ocorrência dos eventos perigosos. Consequentemente, a antecedência é um componente fundamental dos alertas.

No exemplo dos limiaries aqui definidos para Jaraguá do Sul (SC), o ideal é que o alerta seja emitido antes de atingir o Limiar A, que já prediz a ocorrência de deslizamentos pontuais. Tendo em conta que os deslizamentos são fenômenos rápidos, que ocorrem no espaço temporal de alguns segundos ou minutos, a única maneira de prevê-los e enviar alertas com antecedência suficiente é utilizando a previsão do tempo.

Fatalmente, a previsão do tempo irá adicionar incertezas ao alerta emitido, que se somam àquelas já inerentes aos limiaries de chuva, especialmente para os sistemas meteorológicos convectivos que se desenvolvem rapidamente e causam chuvas que

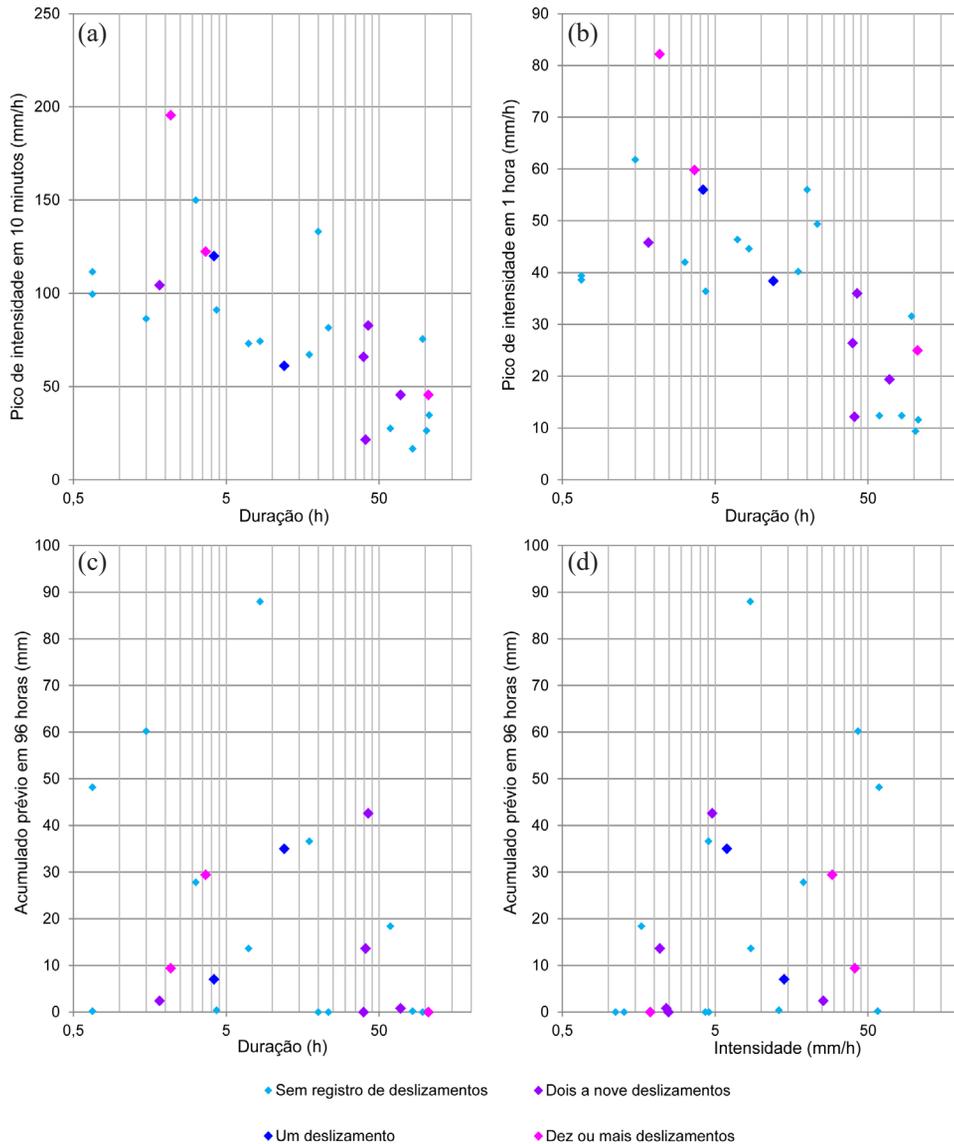


FIGURA 10 – Gráficos mostrando as relações entre chuva e duração dos eventos acima do Limiar A (para os eventos de chuva sem deslizamentos foram considerados os dados do pluviômetro 420890607A). Os gráficos (a) e (b) apresentam a relação entre os picos de intensidade de chuva de cada evento (em 10 min e em 1 h) e a sua duração. Os gráficos (c) e (d) representam a relação entre os acumulados de chuva prévios (desconsiderado o evento deflagrador) em até 96 horas e a duração e intensidade dos eventos acima do Limiar A.

FIGURE 10 – Graphs showing the relationships between rainfall and duration of events above Threshold A (for rainfall events without landslides, data from pluviometer 420890607A were considered). Graphs (a) and (b) show the relationship between the rainfall intensity peaks of each event (in 10 minutes and in 1 hour) and their duration. Graphs (c) and (d) represent the relationship between previous rainfall accumulated (disregarding the triggering event) in up to 96 hours and the duration and intensity of events above Threshold A.

atingem os limiares em poucas horas. Portanto, a compreensão dos sistemas meteorológicos capazes de gerar chuvas que ultrapassam os limiares para deflagração de deslizamentos, bem como sua sazonalidade e frequência, é fundamental para se determinar os equipamentos, modelos e métodos de pre-

visão do tempo apropriados para emissão de alertas com a antecedência necessária. Neste sentido, os limiares intensidade-duração fornecem um importante ponto de partida, pois permitem discernir os eventos de curta duração daqueles eventos causados por fenômenos climáticos mais duradouros.

7 CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que os limiares intensidade-duração são capazes de auxiliar na previsão dos deslizamentos deflagrados pela chuva. Uma vez implementados em sistemas de alertas, estes limiares têm o potencial de contribuir para a prevenção de desastres naturais causados por deslizamentos.

Praticamente inexistentes no Brasil, a construção destes limiares depende da existência de dados sistematizados de chuva com resolução temporal adequada, bem como do registro de ocorrências de deslizamentos com dados confiáveis de localização e horário da deflagração. Informações como estas só passaram a ter abrangência nacional a partir da instalação dos pluviômetros do Cemaden e do registro de ocorrências de desastres naturais pelo Cemaden e outros órgãos relacionados à prevenção de desastres.

Foram elaborados dois limiares para o município de Jaraguá do Sul: um para eventos com pelo menos um deslizamento (Limiar A) e outro para eventos com dez ou mais deslizamentos (Limiar B), com taxas de acerto médias de até 29,8% e 62,5%, respectivamente. Estimou-se que 3,2% dos eventos de chuva ocorridos entre 2016 e maio/2022 estão acima do Limiar A e que 0,4% estão acima do Limiar B. A previsão destes eventos pode se beneficiar de futuros estudos que tenham como objetivo a compreensão da sua sazonalidade, bem como dos sistemas meteorológicos a eles associados.

Os resultados aqui apresentados encorajam a expansão dos estudos de limiares intensidade-duração para outros municípios e regiões de maneira a aperfeiçoar o potencial da previsão de desastres naturais causados por deslizamentos. Análises posteriores podem explorar o aprimoramento da metodologia aqui proposta ao testar outras definições de evento de chuva, assim como incluir parâmetros ou modelos que descrevam a precipitação acumulada ou a umidade antecedente do solo (GODT *et al.* 2006, BAUM & GODT 2010), bem como explorar o papel dos picos de intensidade da chuva na deflagração dos deslizamentos.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos colegas do Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), à Defesa Civil do Estado de Santa Ca-

tarina e à Defesa Civil do Município de Jaraguá do Sul pelas informações acerca dos eventos deslizamento no município, assim como aos colegas do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) que contribuíram na sistematização destas informações. Também agradecem aos revisores anônimos cujas valiosas contribuições e reflexões originais enriqueceram o texto.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEOTTI, P. 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73: 247-265. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007>
- BAUM, R.L.; GODT, J.W. 2010. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*, 7: 259-272. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0177-0>
- BERTOLI, D. 2006. *Dinâmica da paisagem da sub-bacia do ribeirão Chico de Paulo (Jaraguá do Sul - SC): urbanização e conflitos decorrentes*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Dissertação de Mestrado, 117 p.
- CAINE, N. 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 62(1/2): 23-27. <https://doi.org/10.2307/520449>
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2011. *Setorização de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações: Jaraguá do Sul, SC*. CPRM, Ministério de Minas e Energia, Relatório Técnico. Disponível em <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18719>. Acessado em 01 set. 2022.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2019. *Setorização de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações: Jaraguá do Sul, SC*. CPRM, Ministério de Minas e Energia, Relatório Técnico. Disponível em <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18719>. Acessado em 01 set. 2022.
- D'ORSI, R.N. 2011. *Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da Serra*

- dos Órgãos da Rodovia Federal BR-116 RJ (Rio-Teresópolis)*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 287 p.
- D'ORSI, R.N.; PAES, N.M.; MAGALHÃES, M.A.; COELHO, R.S.; COSTA, L.C. 2012. *Relatório de correlação entre chuvas e escorregamentos para a cidade do Rio de Janeiro no ano de 2010*. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, Relatório GEO-RIO/DEP/GPE n. 10/2012, 58 p.
- FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.G.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.; GREENBERG, H. 2001. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2(1): 51-71. <https://doi.org/10.20502/rbg.v2i1.8>
- GODT, J.W.; BAUM, R.L.; CHLEBORAD, A.F. 2006. Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(1): 97-110. <https://doi.org/10.1002/esp.1237>
- GOUVEIA, R.L.; CAMPOS, C.C.; MENEZES, J.T.; MOREIRA, G.F. 2018. Análise de frequência de precipitação e caracterização de anos secos e chuvosos para a Bacia do Rio Itajaí. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22: 309-323. <http://dx.doi.org/10.5380/ab-clima.v22i0.55276>
- GUIDICINI, G.; IWASA, O.Y. 1977. Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 16: 13-20. <https://doi.org/10.1007/BF02591434>
- GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S.; ROSSI, M.; STARK, C.P. 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98: 239-267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S.; ROSSI, M.; STARK, C.P. 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5: 3-17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2022. *Cidades*. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/jaragua-do-sul/panorama>. Acessado em 03 set. 2022.
- INTRIERI, E.; GIGLI, G.; CASAGLI, N.; NADIM, F. 2013. Landslide Early Warning System: toolbox and general concepts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 85-90. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-85-2013>
- KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.S.F.; RUDORFF, F.M. 2006. *Prevenção de Desastres Naturais – Conceitos Básicos*. Organic Trading, Curitiba, 109 p.
- LARSEN, M.C.; SIMON, A. 1993. A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 75(1-2): 13-23. <https://doi.org/10.1080/04353676.1993.11880379>
- MATURIDI, A.M.A.M.; KASIM, N.; TAIB, K.A.; AZAHAR, W.N.A.W.; TAJUDDIN, H.B.A. 2021. Empirically based rainfall threshold for landslides occurrence in Peninsular Malaysia. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25: 4552-4566. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1586-4>
- MENDES, R.M.; VALERIO FILHO, M.; BERTOLDO, M.A.; SILVA, M.F. 2015. Estudo de limiares críticos de chuva deflagradores de deslizamentos no município de São José dos Campos/SP (Brasil). *Territorium*, 22: 119-129. https://doi.org/10.14195/1647-7723_22_8
- METODIEV, D.; ANDRADE, M.R.M.; MENDES, R.M.; MORAES, M.A.E.; KONIG, T.; BORTOLOZO, C.A.; BERNARDES, T.; LUIZ, R.A.F.; COELHO, J.O.M. 2018. Correlation between rainfall and mass movements in North Coast Region of São Paulo State, Brazil for 2014-2018.

- International Journal of Geosciences*, 9: 669-679. <https://doi.org/10.4236/ijg.2018.912040>
- MOLINA, E.A.N.; CARDOSO, A.O.; NOGUEIRA, F.R. 2015. Relação precipitação-deslizamento no município de São Bernardo do Campo – SP. *Ciência e Natura*, 37: 46-54. <https://doi.org/10.5902/2179460X16214>
- PANDOLFO, C.; BRAGA, H.J.; SILVA JÚNIOR, V.P.; MASSIGNAN, A.M.; PEREIRA, E.S.; THOMÉ, V.M.R.; VALCI, F.V. 2002. *Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina*. Florianópolis, EPAGRI.
- PINTO, E.J.A.; AZAMBUJA, A.; FARIAS, J.A.M.; SALGUEIRO, J.P.B.; PICKBRENNER, K. 2011. *Atlas pluviométrico do Brasil*. Rio de Janeiro, Serviço Geológico do Brasil (CPRM).
- REICHENBACH, P.; CARDINALI, M.; DE VITA, P.; GUZZETTI, F. 1998. Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (Central Italy). *Environmental Geology*, 35(2-3): 146-159. <https://doi.org/10.1007/s002540050301>
- SAITO, H.; NAKAYAMA, D.; MATSUYAMA, H. 2010 Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration thresholds in Japan. *Geomorphology*, 118: 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.12.016>
- SANTA CATARINA. 2016. *Atlas geográfico de Santa Catarina: diversidade da natureza - fascículo 2*. Editora UDESC, Florianópolis, Secretaria de Estado do Planejamento. Diretoria de Estatística e Cartografia, 2.ed. Disponível em <https://www.udesc.br/faed/geografia/atlasgeografico>. Acessado em 03 set. 2022.
- SANTORO, J; MENDES, R.M.; PRESSINOTTI, M.M.N.; MANOEL, G.R. 2010. Correlação entre chuvas e deslizamentos ocorridos durante a operação do Plano Preventivo de Defesa Civil em São Paulo, SP. In: ABGE/CTCGG, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEO-AMBIENTAL, 7, Maringá, *Anais*, 1-15.
- SEGONI, S.; PICIULLO, L.; GARIANO, S.L. 2018. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15: 1483-1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- SILVA, F.A. 2014. *Percepção dos riscos e desastres ambientais dos anos 2008 e 2011 em Jaraguá do Sul – SC*. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas, Dissertação de Mestrado, 106 p.
- SILVA, F.A.; PINTO, A.L. 2013. Vulnerabilidade no município de Jaraguá do Sul, SC: Estudo dos efeitos das chuvas de 2008. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental Da Alta Paulista*, 9(8): 62-70. <https://doi.org/10.17271/19800827982013466>
- TABALIPA, L.K. 2019. *Aplicação do Modelo SHALSTAB para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais: estudo de caso em Jaraguá do Sul, SC*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Dissertação de Mestrado, 150 p.
- TATIZANA, C.; OGURA, A.T.; CERRI, L.E.S.; ROCHA, M.C.M. 1987. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos – Serra do Mar, município de Cubatão. In: ABGE, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, São Paulo, *Anais*, 2: 225-236.
- UNDRR – UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. 2015. *Global assessment report on disaster risk reduction: making development sustainable – The future of disaster risk reduction*. UN, New York, 316 p.
- WIECZOREK, G.F.; GLADE, T. 2005. Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: M. Jakob & O. Hungr (eds.) *Debris flow hazards and related phenomena*. Berlin, Springer, p. 325-362.
- WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. 2018. *Multi-hazard Warning Systems: A Checklist*. Disponível em <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/natural-hazards-and-disaster-risk-reduction/mhews-checklist>. Acessado em 01 set. 2022.
- WOLLE, C.M.; CARVALHO, C.S. 1989. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil. *Solos e Rochas*, 12: 27-36.

Endereço dos autores:

Rodrigo Augusto Stabile*, Rafael Alexandre Ferreira Luiz, Andrezza Marques Ferreira, Harideva Maturano Egas e Márcio Roberto Magalhães de Andrade – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), Estrada Doutor Altino Bondesan, 500, Distrito de Eugênio de Melo, CEP: 12.247-016, São José dos Campos, SP, Brasil. *E-mails*: rodrigo.stabile@cemaden.gov.br, rafael.luiz@cemaden.gov.br, andrezza.ferreira@cemaden.gov.br, harideva.egas@cemaden.gov.br, marcio.andrade@cemaden.gov.br

* Autor correspondente

Artigo submetido em 25 de setembro de 2022, aceito em 29 de novembro de 2022.



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.