

Uma Revisão Acerca dos Estudos sobre Limiares Pluviométricos para Ocorrência de Deslizamentos

Fernanda Cristina Gonçalves Gonzalez

Doutoranda, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, fernandacgg@poli.ufrj.br

Marcos Barreto de Mendonça

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, mbm@poli.ufrj.br

Assed Naked Haddad

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, assed@poli.ufrj.br

RESUMO: O presente trabalho apresenta uma revisão de estudos científicos publicados entre 2008 e 2021 sobre a definição de limiares de chuva para a deflagração de deslizamentos, considerando modelos determinísticos e estatísticos, reunindo 225 artigos científicos em língua inglesa. Além de um perfil bibliométrico, foi elaborado um levantamento sobre os tipos de parâmetros pluviométricos, método de análise estatística, período abrangido pela série histórica, frequência de medição da precipitação etc. Observou-se um aumento expressivo no número de publicações ao longo do período analisado. No entanto, algumas regiões do mundo, apesar de altamente suscetíveis a deslizamentos ainda são pouco representadas nos estudos, o que evidencia lacunas relevantes na cobertura geográfica das pesquisas sobre limiares de chuva. As principais limitações identificadas nos estudos analisados foram a grande variação dos dados usados nos limiares de chuva, a baixa densidade de estações pluviométricas em algumas regiões e a quantidade insuficiente de dados de chuva e deslizamentos utilizadas em métodos estatísticos. O estudo mostra ainda a necessidade de avanços na definição dos períodos de chuva adotados, para aumentar a confiabilidade dos limiares de chuva.

PALAVRAS-CHAVE: Deslizamentos, Limiares de chuva, Limiares estatísticos, Chuva acumulada.

ABSTRACT: This paper presents a review of scientific studies published between 2008 and 2021 on the definition of rainfall thresholds of triggered landslides, considering deterministic and statistical models, bringing together 225 scientific articles in English. In addition to a bibliometric profile, a survey was conducted on the types of rainfall parameters, statistical analysis methods, time period covered by the historical series, frequency of rainfall measurements, etc. A significant increase in the number of publications was observed over the analyzed period. However, some regions of the world, despite being highly susceptible to landslides, are still underrepresented in studies, highlighting significant gaps in the geographic coverage of rainfall threshold researches. The main limitations identified in the analyzed studies were the wide variation in the data used in rainfall thresholds, the low density of rainfall stations in some regions, and the insufficient amount of rainfall and landslide data used in statistical methods. The study also highlights the need for improvements in the definition of the adopted rainfall periods to increase the reliability of rainfall thresholds.

KEYWORDS: Landslides, Rainfall thresholds, Statistical thresholds, Accumulated rainfall.

1 INTRODUÇÃO

A definição de parâmetros físicos para avaliar a probabilidade de ocorrência de deslizamentos em escala regional é importante para melhorar a preparação e resposta aos desastres associados a tais eventos. Conhecendo-se a probabilidade de ocorrência de deslizamentos é possível tomar a decisão de acionar os estágios do sistema de alerta em tempo suficiente para que a população e os órgãos competentes possam se mobilizar para evitar perdas humanas e materiais. O baixo índice de acertos no acionamento de um sistema de alerta (cedo demais ou tarde demais) resulta na falta de confiabilidade do sistema por parte da população, comprometendo sua eficácia.



2025

O limiar de chuva é o valor de pluviometria a partir do qual existe uma probabilidade alta de ocorrer deslizamentos no local para o qual foi definido. Os primeiros estudos de limiares de chuva ocorreram na década de 1970, com destaque para os de CAMPBELL, (1975); GUIDICINI; IWASA, (1977); LUMB, (1975); NILSEN; TURNER, (1975); ONODERA; YOSHINAKA; KAZAMA, (1974). Posteriormente, GUZZETTI et al. (2008) apresentou uma revisão sobre limiares do tipo intensidade-duração, e tornou-se um marco para os estudos de limiares de chuva para deflagração de movimentos de massa, sendo até hoje uma importante referência sobre o tema.

O presente trabalho investigou os artigos científicos, publicados entre 2008 e 2021, visando, além da bibliometria, obter dados relacionados a tipologia do limiar, período de observação de dados, resolução temporal e espacial, tipo de observação de dados (duração e intensidade, por exemplo) e método adotado para obtenção dos limiares.

2 METODOLOGIA

A pesquisa foi do tipo exploratória, realizada na base de dados do Google Acadêmico, considerando artigos da língua inglesa publicados entre 2008 e 2021. Foram realizadas buscas pelos termos "landslide" (movimento de massa), "rainfall threshold" (limiar de chuva), "early warning system" (sistema de alerta), "soil" (solo), "probability" (probabilidade) e "rainfall triggering" (chuva deflagradora). O período de análise tem início em 2008, ano em que o trabalho de revisão de GUZZETTI et al. (2008) marcou um ponto de referência histórico nas pesquisas da área. Desses artigos foram considerados aqueles que propuseram algum tipo de limiar pluviométrico, chegando a um total de 225 trabalhos. A Tabela 1 apresenta as informações levantadas para cada um dos artigos.

Tabela 1. Informações reunidas dos artigos pesquisados e apresentados no presente trabalho.

Dados bibliométricos	Caracterização do limiar de chuva	Dados metodológicos (para limiares estatísticos)
Ano de publicação	País da área de estudo	Tipo de limiar quanto à observação das chuvas
-	Abrangência do limiar de chuva (local ou regional)	Método estatístico adotado para obtenção do limiar
-	Vinculação do estudo à aplicação em um sistema de alerta	Tamanho da série histórica utilizada
-	Tipo de método de definição do limiar (determinístico ou estatístico)	Quantidade de eventos utilizados na estatística do limiar
-	-	Resolução temporal de medição
-	-	Densidade de pluviômetros

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Dados bibliométricos

3.1.1 Ano de publicação

As publicações cresceram do primeiro ano observado até 2021, como pode ser observado pela Figura 1, que compara as publicações e os desastres decorrentes de movimentos de massa no período observado registrados pelo EM-DAT (2022), banco de dados que registra desastres ocorridos no mundo, porém somente os de grande magnitude. O aumento das publicações ao longo dos anos pode ter sido impulsionada pela influência do Marco de Ação Hyogo de 2005, que destacou a importância dos sistemas de alerta (UNISDR, 2005) e posteriormente do Marco de Sendai para a Redução de Riscos e Desastres em 2015 que estimulou o aprimoramento das medidas de resposta efetiva aos desastres, especialmente sistemas de alerta (UNISDR, 2015).

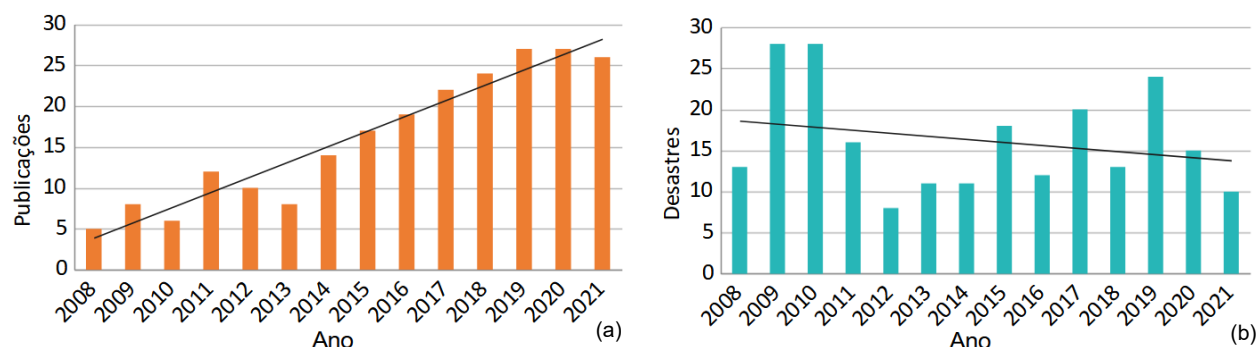


Figura 1. Evolução das publicações (a) e desastres (b) ocorridos em todo o mundo entre 2008 e 2021.

3.2 Dados dos limiares de chuva

3.2.1 País da área de estudo

50,7% dos artigos levantados enfocam limiares de chuva para regiões na Ásia, embora o país que recebeu mais estudos individualmente seja a Itália com 24,2%, seguido da China com 17,5%. A Figura 2 apresenta a distribuição espacial da quantidade de trabalhos de limiares de chuva, mostrando que há menos de 10 trabalhos/país para a América do Sul, e menos ainda para os países da África e da Oceania. Apesar dessa concentração dos estudos, os dados de desastres por região ocorridos nesse período (EM-DAT, 2022) mostram que a maioria (59,5%) dos desastres associados a deslizamentos ocorreram na Ásia, seguidos da África (15,9%) e América do Sul (14,5%), como mostra a tabela 2.

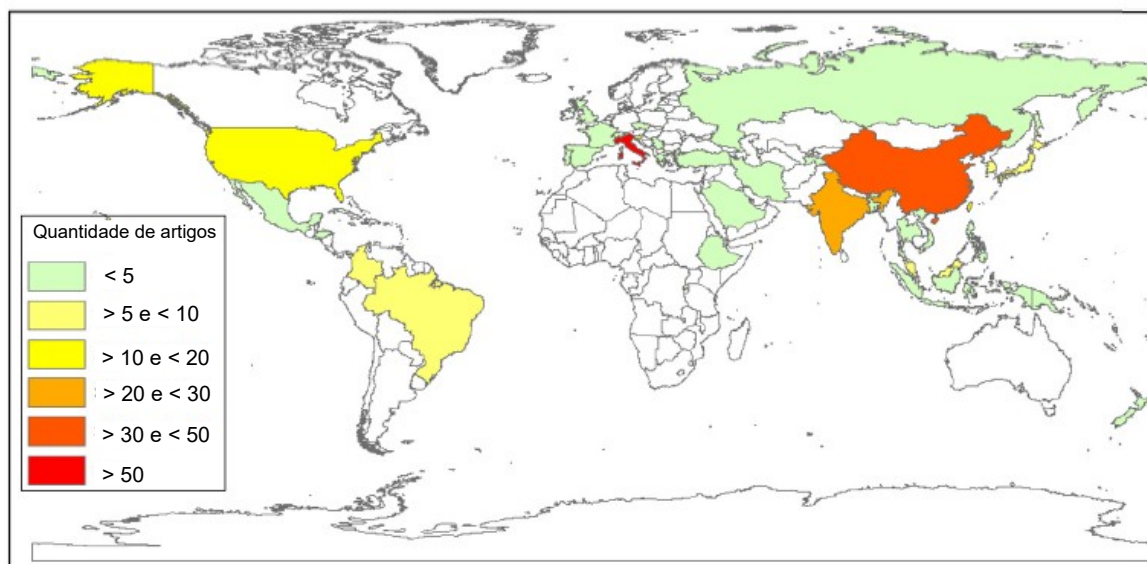


Figura 2. Quantidade de artigos com área de estudo em cada país.

Tabela 2. Distribuição percentual de artigos publicados e desastres associados a deslizamentos.

Continente	Distribuição da quantidade de desastres associados a deslizamentos (2008-2021)	Distribuição da quantidade de estudos de caso (2008-2021)
América do Sul	14,5%	5,5%
América do Norte	0,9%	5,8%
América Central	4,8%	2,7%
África	15,9%	0,9%
Ásia	59,5%	50,7%
Europa	2,2%	33,6%
Oceania	2,2%	0,9%

3.2.2 Abrangência espacial do limiar de chuva

A abrangência espacial do limiar de chuva pode ser local, geralmente quando associado a uma encosta, regional, nacional ou global. Os limiares globais e nacionais, a depender da extensão do país, são muito pouco precisos, uma vez que desconsideram a grande variação dos diversos fatores físicos e climáticos que condicionam a ocorrência de deslizamentos. Como resultado se observou que 72,9% dos estudos são regionais, seguido de 12,9% locais, 9,3% nacionais, 4,0% locais aplicados a rodovias/ferrovias e 0,9% globais.

3.2.3 Aplicação em um sistema de alerta

Considerando o propósito do limiar de chuva descrito nos artigos, alguns têm por objetivo a aplicação a sistemas de alerta já estabelecidos ou não, enquanto outros são apenas para finalidade de pesquisa. Somente 32,9% dos artigos citam que os limiares foram definidos para um sistema de alerta específico.

3.2.4 Tipo de métodos de definição do limiar de chuva

Os métodos de definição dos limiares de chuva podem ser do tipo estatísticos, baseadas na observação de uma série histórica de registros de chuvas e deslizamentos, ou determinísticos, aqueles que utilizam modelos matemáticos hidrogeológicos. 69,3% dos artigos utilizaram os métodos estatísticos, 20,9% determinísticos e 9,8% determinísticos e estatísticos de forma combinada, como, por exemplo, os casos em que um método determinístico é usado para a validação dos resultados de um método estatístico. Os 178 artigos que desenvolveram limiares estatísticos e estatísticos/determinísticos serão analisados nas próximas sessões.

3.3 Dados metodológicos dos limiares baseados em métodos estatísticos

3.3.1 Tipo de limiar de chuva

Os limiares baseados em métodos estatísticos em geral são funções de dois parâmetros relacionados a medição de chuva observada, sendo mais comumente do tipo: Intensidade-Duração (ID), Chuva Acumulada (AR), Evento-Duração (ED) e Intensidade-Evento (IE). A intensidade de chuva é a média horária de chuva, ou seja, o acumulado dividido pelo tempo do evento pluviométrico; o evento de chuva é a pluviometria acumulada no período que durou a chuva; e a chuva acumulada é o valor de chuva lido em um período fixo (como 24h, por exemplo). Foram encontrados também trabalhos que analisam separadamente apenas um parâmetro isolado (E, D ou I). A distribuição dos artigos de acordo com cada tipo de limiar com base estatística é apresentada na Figura 3, onde é possível ver que a maioria dos limiares são do tipo Intensidade-Duração, seguido de Chuva Acumulada.

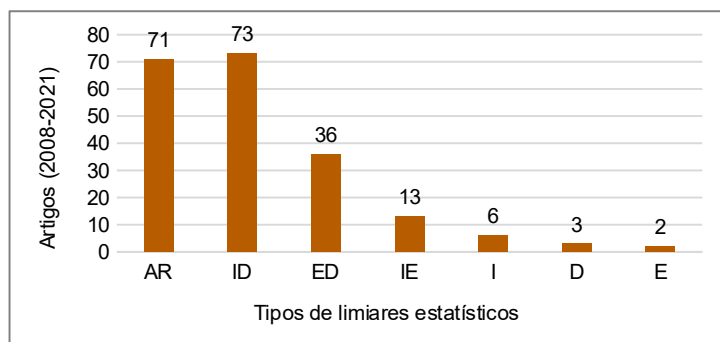


Figura 3. Distribuição dos artigos de acordo com o parâmetro de chuva.

3.3.2 Tipo de método estatístico

O método estatístico aplicado na determinação dos limiares de chuva tem por objetivo estudar a associação entre os parâmetros de chuva apresentados anteriormente (I, D e E) e a ocorrência de deslizamentos.

Foi encontrada uma grande quantidade de métodos estatísticos adotados na determinação dos limiares de chuva, sendo categorizados em 7 grupos (Figura 4). Observou-se que a maioria dos limiares de chuva são

definidos a partir de modelos de regressão, seguidos por outro tipo de distribuição estatística (como correlação, qui-quadrado, t-student, etc).

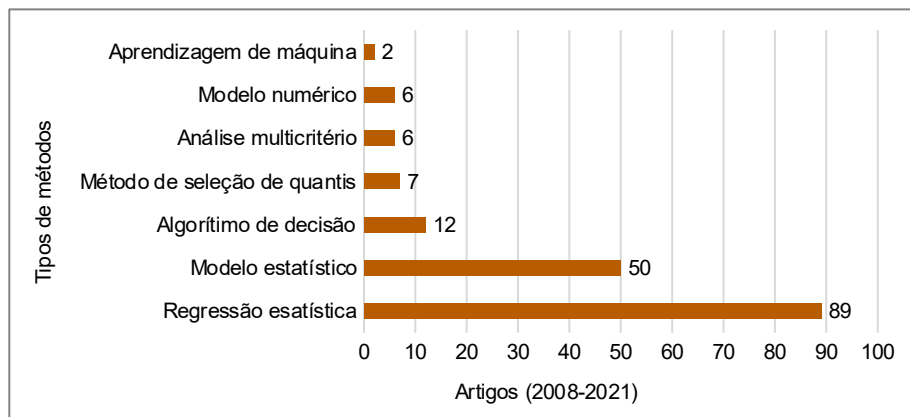


Figura 4. Distribuição dos artigos de acordo com o grupo de métodos estatísticos para definição dos limiares.

3.3.3 Série histórica de chuva considerada no estudo

O tamanho da série histórica de dados de chuva, em anos, é determinante para métodos estatísticos, uma vez que a amostra utilizada deve ser grande o bastante para que os resultados sejam consistentes. A Figura 5 mostra a distribuição dos artigos de acordo com o tamanho das séries históricas por faixas de período de observação. De 178 artigos, 76 (ou 42,7%) possuem base de dados menores do que 10 anos de observação, evidenciando uma limitação da amostra estatística.

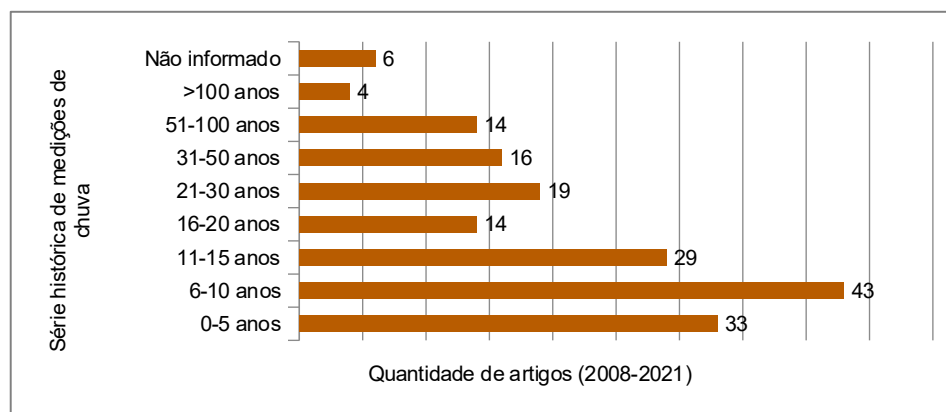


Figura 5. Distribuição dos artigos de acordo com o tamanho da série histórica de chuva considerada.

3.3.8 Tamanho da amostra de deslizamentos considerada nos estudos

Assim como o tamanho da série histórica de medições e chuva, a quantidade de eventos de deslizamento também é importante para a robustez do modelo que relaciona estatisticamente pluviometria e eventos de deslizamento. A Figura 6 mostra a distribuição dos artigos de acordo com o tamanho da amostra de eventos de deslizamentos. A maior parte dos estudos (44 ou 24,7%) é desenvolvida sobre uma base de 50 ou menos eventos de deslizamentos, o que pode significar uma limitação.

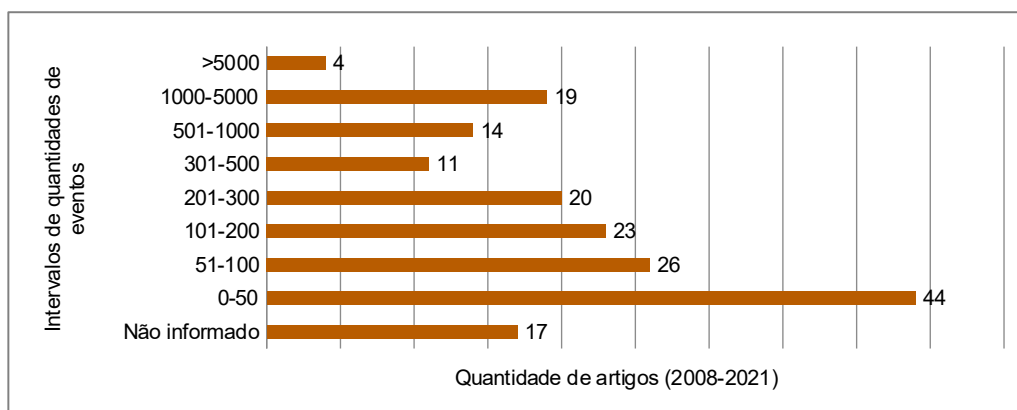


Figura 6. Distribuição dos artigos de acordo com o tamanho de cada amostra de eventos de deslizamentos para a definição dos limiares.

3.3.4 Resolução temporal das medições de pluviometria

A resolução temporal é estabelecida pela frequência com que são feitas as leituras de chuvas acumuladas (horária, diária, etc), sendo também condicionada pela precisão com que é feito o registro do deslizamento. Quanto melhor a resolução temporal (menor o intervalo de tempo entre as medições pluviométricas), maior será a precisão ao relacionar estatisticamente a chuva com o deslizamento. Porém, isso só faz sentido se existir uma boa confiabilidade no horário de ocorrência do deslizamento. A Figura 7 apresenta a frequência de medição de chuva dos dados adotados nos limiares. É possível observar que 103 (57,9%) dos artigos definiram limiares de chuva com base em dados medição pluviométrica diária, e 53 (29,8%) com medição horária.

Quando o intervalo entre as medições é longo, como o de 24h, ou quando não há registro do horário do deslizamento, torna-se necessário a adoção de um critério para estabelecer o horário de ocorrência do deslizamento). Um fator a ser considerado é que alguns trabalhos mostraram que os deslizamentos não ocorreram de forma recorrente no pico da intensidade de chuva ou imediatamente após o final da chuva, e que as chuvas acumuladas anteriormente possuem grande impacto na ocorrência de deslizamentos (GODT; BAUM; LU, 2009; MENDONÇA; GONZALEZ; COELHO, 2020; WIECZOREK; GLADE, 2007; ZHANG; LIU, 2010). Diante disso, não se pode admitir, necessariamente, que o horário de ocorrência do deslizamento é o mesmo do pico de intensidade de chuva.

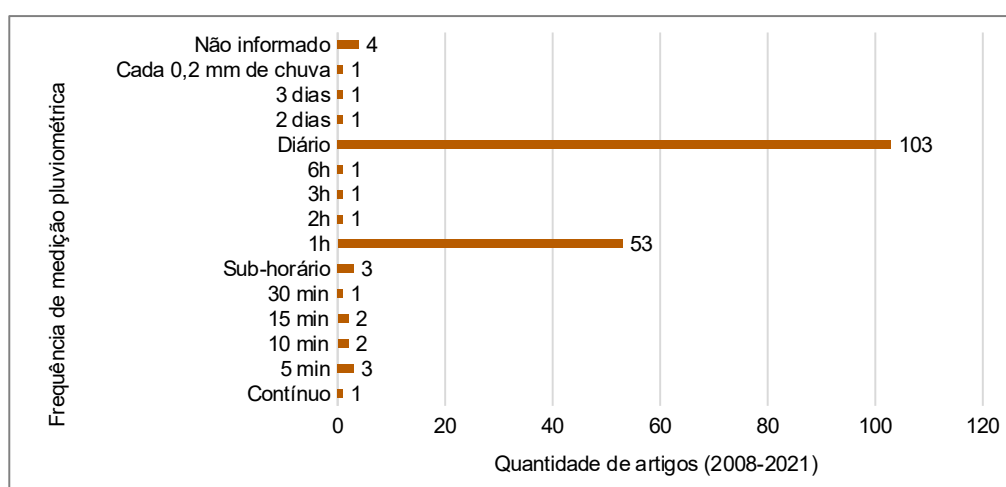


Figura 7. Distribuição dos artigos de acordo com a frequência de medição pluviométrica para obtenção de limiares.

3.3.6 Densidade de pluviômetros

A densidade de pluviômetros é indicador para avaliar a representatividade da chuva para o local onde correu um determinado deslizamento (NIKOLOPOULOS *et al.*, 2015). Quanto maior a densidade de pluviômetros maior a chance do local da medição das chuvas ter as mesmas características climáticas do local do deslizamento. A Figura 8 mostra que a maior parte dos artigos não informou a densidade de pluviômetros, e a maioria daqueles que informaram (19,1%) possui um valor menor do que 1 pluviômetro por km², mostrando que as áreas representadas pelos pluviômetros geralmente são muito extensas.

GONZALEZ *et al.* (2024) apresentam resultados de outros aspectos referentes ao processo de definição dos limiares de chuva para a deflagração de deslizamentos, baseando-se neste mesmo conjunto de artigos, bem como o aprofundamento das discussões acerca dessa revisão.

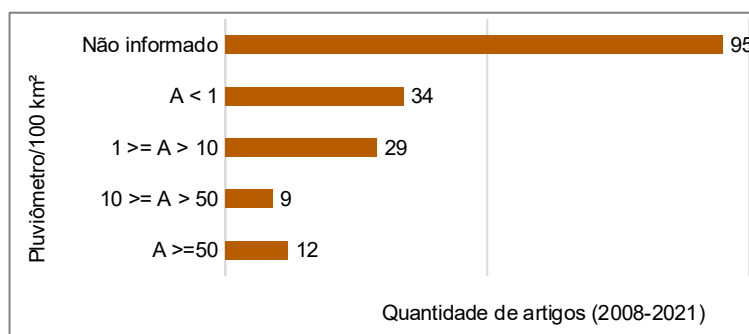


Figura 8. Distribuição dos artigos de acordo com a densidade de pluviômetros.

4 CONCLUSÃO

Estímulos, provavelmente proporcionados pelas diretrizes internacionais para a redução de risco de desastres indicadas pelos Marco de Hyogo (2005) e de Marco de Sendai (2015) contribuíram para o aumento ao longo dos anos de estudos que definiram de limiares de chuva para deslizamentos. Apesar desse aumento, pode-se notar que muitos locais onde se concentram a maioria dos deslizamentos não são objetos de estudo dos artigos encontrados nesta revisão.

A grande variação de métodos estatísticos desenvolvidos para a obtenção de limiares de chuva torna difícil a comparação de performance entre eles. Uma importante lacuna identificada é a falta de estabelecimento de um critério para o horário da ocorrência dos deslizamentos, pois a maioria dos eventos considerados não possui uma base de dados horária de chuva e registro de deslizamentos. Um aspecto que merece atenção é a falta de informação sobre a densidade de pluviômetros considerados nos trabalhos, dificultando a avaliação da representatividade das medições pluviométricas e, consequentemente, da qualidade dos limiares.

Para o melhor desenvolvimento de limiares de chuva estatísticos, e assim um melhor aproveitamento para seu uso em sistemas de alerta, é necessário melhorar a qualidade e a quantidade dos dados. Medições de chuva mais frequentes e maior densidade de pluviômetros, assim como descrições mais precisas da ocorrência de deslizamentos, combinadas com registros que se mantenham constantes ao longo dos anos são essenciais para permitir o desenvolvimento de novos limiares de chuva e aprimorar os existentes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), que apoiaram esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Campbell, R. H. *Soil Slips, Debris Flows, and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California. Professional Paper.* [S.l: s.n.], 1975.



- EM-DAT. *The international disasters database*. Disponível em: <https://www.emdat.be/emdat_db/>. Acesso em: 1 mar. 2022.
- Godt, J. W.; Baum, R. L.; Lu, N. Landsliding in partially saturated materials. *Geophysical Research Letters*, v. 36, n. 2, p. 1–5, 2009.
- Guidicini, G.; Iwasa, O. Y. Essai de correlation entre la pluviosite et les glissements de terrain sous climat tropical humide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, v. 16, n. 1, p. 13–20, 1977.
- Guzzetti, F. *et al.* The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, v. 5, n. 1, p. 3–17, 2008.
- Lumb, P. Slope failures in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 8, n. 1, p. 31–65, 1975.
- Mendonça, M. B. DE; Gonzalez, F. C. G.; Coelho, G. V. da S. Likelihood of landslide occurrences for definition of rainfall thresholds applied to the Quitandinha river basin, Petrópolis, Brazil. *Landslides*, n. August, 2020.
- Nikolopoulos, E. I. *et al.* Estimation of debris flow triggering rainfall: Influence of rain gauge density and interpolation methods. *Geomorphology*, v. 243, p. 40–50, 15 ago. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X15002482?via%3Dihub>>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- Nilsen, T. H.; Turner, B. L. *Influence of rainfall and ancient landslide deposits on recent landslides (1950-71) in urban areas of Contra Costa County, California. Bulletin*. [S.l: s.n.], 1975. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/b1388>>. Acesso em: 1 out. 2020.
- Onodera, T.; Yoshinaka, R.; Kazama, H. Slope failures caused by heavy rainfall in Japan. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, v. 15, n. 4, p. 191–200, 30 dez. 1974. Disponível em: <<http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.Journalarchive/jjseg1960/15.191?from=CrossRef>>. Acesso em: 1 out. 2020.
- UNISDR. *Hyogo Framework for Action: 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters*. . [S.l: s.n.], 2005. Disponível em: <www.unisdr.org/we/in/ia>. Acesso em: 17 ago. 2021.
- UNISDR. *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030*. . [S.l: s.n.], 2015.
- Wieczorek, G. F.; Glade, T. Climatic factors influencing occurrence of debris flows. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 325–362. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-27129-5_14>. Acesso em: 26 out. 2020.
- Zhang, M.; Liu, J. Controlling factors of loess landslides in western China. *Environmental Earth Sciences*, v. 59, n. 8, p. 1671–1680, 2010.