



COMPARAÇÃO ENTRE INDICES DE CHUVA ACUMULADA SIMPLES E EFETIVA PARA A PREVISÃO DE DESLIZAMENTOS NO MUNICÍPIO DE GUARUJÁ/SP

Daniel Metodiev¹
Rodolfo Moreda Mendes²
Márcio Roberto Magalhães de Andrade³
Cassiano Antônio Bortolozo⁴
Rodrigo Augusto Stabile⁵
Pedro Ivo Mioni Camarinha⁶
José Victor Orlandi Simões⁷

RESUMO

O município de Guarujá possui um vasto histórico de deslizamentos. A área de morros é caracterizada por migmatitos e anfibolitos. O topo rochoso posiciona-se entre 5 e 10 m com superfície de ruptura de até 3 m. A deflagração acontece em solos residuais argilo-arenosos onde a ruptura ocorre acima do saprolito. Nos dias 02 e 03 de março de 2020 um evento climático afetou o município e vitimou 34 moradores. Nesse trabalho é feita uma análise dos acumulados pluviométricos obtidos pela rede observacional do CEMADEN/MCTI, correlacionando-os com os dados de ocorrências de deslizamentos rasos registradas pela Defesa Civil municipal e pelo SIDEC. As correlações entre as ocorrências e os índices de chuva foram determinadas dentro do período de 12/2019 a 11/2020. Foi analisada a chuva acumulada simples, comparada com o tipo de cálculo meia-vida, considerando os valores de chuva efetiva do conteúdo da água retida no solo. Os cálculos das chuvas acumuladas simples e efetivas meia-vida foram realizados através de dois softwares desenvolvidos por pesquisadores do CEMADEN/MCTI, analisando os intervalos de 1 e 96 horas. Para elaborar os gráficos foi utilizado o programa computacional MATLAB. O agrupamento hierárquico de cluster realizou separação dos índices de chuva que deflagraram os deslizamentos dentro desse evento, realizando automaticamente as divisões dos grupos e posicionando os entre as envoltórias já estabelecidas que correspondem aos limiares pluviométricos de referência da região da Baixada Santista. A interação entre esse evento de chuva com ocorrências e as chuvas sem ocorrências ao longo do período analisado indica uma posição relativa da linha de referência que separa a Zona Segura e a Zona Insegura. A análise de cluster apresentou boa relevância, definindo níveis de chuva moderada, alta, muito alta e extrema, sugerindo assim cenários específicos de deslizamentos induzidos, ocasionais, múltiplos e generalizados dentro de um evento de chuva.

¹ Doutorando do PPG em Desastres Naturais da UNESP-CEMADEN, daniel.metodiev@cemaden.gov.br;

² Professor orientador: Doutor, UNESP - CEMADEN/MCTI, rodolfo.mendes@cemaden.gov.br;

³ Professor coorientador: Doutor, UNESP - CEMADEN/MCTI, marcio.andrade@cemaden.gov.br;

⁴ Doutor pelo Curso de Geofísica do IAG da USP, cassianoab@usp.br;

⁵ Doutor pelo Curso de Geografia Física da FFLCH da USP, rodrigo.stabile@cemaden.gov.br;

⁶ Doutor pelo Curso de Ciência do Sistema Terrestre do INPE, pedro.camarinha@cemaden.gov.br;

⁷ Mestrando do PPG em Desastres Naturais da UNESP - CEMADEN/MCTI, jose.orlandi@unesp.br;

INTRODUÇÃO

O município de Guarujá está localizado no litoral atlântico do Estado de São Paulo, possuindo uma área de 144,8 km² e 64 km de faixa costeira, com população estimada de 294973 habitantes (2024) e densidade demográfica de 1.986,5 hab/km² (IBGE, 2025). A área de morros e encostas é caracterizada por rochas cristalinas, principalmente migmatitos e anfibolitos estromatíticos, que fazem parte do Complexo Costeiro de idade neoproterozóica. As encostas nesta área apresentam declividade alta, com perfis de solo intensamente intemperizado e alterado. Geralmente, os perfis de solo residual e coluvial são cobertos por aterros rasos. Na região as camadas de solo residual são muito finas (2-3 m), sobrepostas diretamente à rocha intemperizada ou saprólito. Em áreas suscetíveis a deslizamentos, o topo rochoso fica em profundidades entre 5 e 10 m. Os ensaios de granulometria apresentam um solo alterado argilo-arenoso com plasticidade média aumentando a fração argilosa em profundidade até atingir o contato com o saprólito - até 73% de argila (Sousa et al., 2023). Geralmente as rupturas ocorrem de 1 até 3 m de profundidade entre as camadas argilo-arenosas residuais sobrejacentes com o solo saprolítico. O processo de deflagração ocorre de forma relativamente rápida, geralmente sem indícios prévios, o que é mais comum em encostas antropizadas, onde estas deflagrações são induzidas (Sousa et al., 2023).

A região de Guarujá tem como característica a alternância de períodos com chuvas intensas nos meses de verão (novembro a março/abril) e períodos mais secos nos demais. A umidade formada sobre o oceano, ao se encaminhar para o continente, encontra uma barreira de serras que impede sua passagem, fazendo com que precipite na vertente leste da serra e na planície litorânea, assim chamado efeito orográfico (Pellegatti & Galvani, 2010). No inverno, há sensível diminuição de chuvas, principalmente em junho, julho e agosto, se comparados aos meses de verão. A precipitação anual varia entre 1.600 e 2.000 mm (Queiroz et al., 2019).

A região do Guarujá possui um vasto registro histórico de ocorrências de deslizamentos (Figura 1b). Na noite do dia 2 e na madrugada do dia 3 de Março de 2020 ocorreu um dos maiores desastres na região de Baixada Santista que atingiu severamente o município de Guarujá. Um evento meteorológico de alta magnitude provocou fortes chuvas com 83 anos de tempo de retorno, provocando dezenas de deslizamentos generalizados do tipo planares rasos (Freitas et al., 2022). Os mais extensos (respectivamente os mais impactantes) foram os deslizamentos do Morro do Macaco Molhado e do Morro de Barreira - João Guarda (Figura 1a). O primeiro

deslizamento vitimou 9 pessoas e o segundo, 23 pessoas como centenas ficaram feridos e deslocados de suas casas. O desastre de 2-3 de Março de 2020 totalizou 44 vítimas fatais nos municípios da Baixada Santista (Freitas et al., 2022).

Visando ampliar as possibilidades de previsão de deslizamentos na região de Guarujá, foram explorados como referencial teórico para correlação dos índices de chuva acumulada simples e da interpretação dos resultados, os trabalhos de Tatizana et al. (1987), Santoro et al. (2010), Metodiev et al. (2018). Para correlação e interpretação dos valores de chuva acumulada efetiva meia-vida foram utilizados como referências os trabalhos de Yano (1990), Consoni et al. (2018) e Bortolozo et al. (2024). Foram explorados os métodos de definição de limiares críticos de chuva, principalmente intensidade-acumulada, utilizando o referencial metodológico do Tatizana et al. (1987).

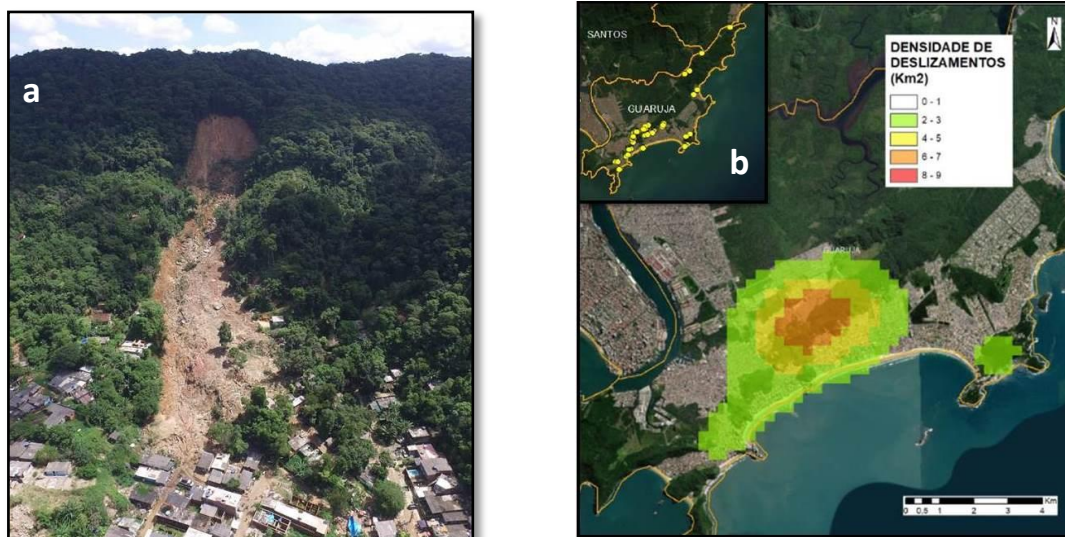


Figura 1 – (a) O deslizamento da Barreira do João Guarda, deflagrado às 2.40h do dia 3 de Março de 2020 que mobilizou mais de 9000 m³ de solo, destruindo 40 casas e causando 23 óbitos (Foto: Defesa Civil Municipal do Guarujá). (b) Mapa de densidade das ocorrências de deslizamento no período 12/2019-11/2020 para o município de Guarujá (CEMADEN, 2020).

METODOLOGIA

No Brasil, tradicionalmente os limiares críticos de chuva são definidos a partir de acumulados de precipitação de 24, 48, 72 ou 96 horas (Tatizana et al., 1987; Santoro et al., 2010 e Metodiev et al., 2018). Foi possível avançar no estudo dos limiares de chuva com maior resolução temporal, após a instalação da rede observacional pluviométrica do CEMADEN/MCTI, iniciada em 2014, cujos pluviômetros registram a

chuva a cada 10 minutos. A análise dos registros de ocorrências de deslizamentos translacionais rasos foi feita a partir do banco de dados da Defesa Civil Municipal de Guarujá e do Sistema de Informação da Defesa Civil (SIDEV) do Estado de São Paulo.

Para realizar a correlação entre os horários de deflagração dos deslizamentos e os índices de chuva acumulada (simples e efetiva) foi definido o período entre 12/2019 e 11/2020. Foram correlacionados os horários de deflagração de 136 ocorrências de deslizamento com os índices de precipitação obtidos dos pluviômetros automáticos do CEMADEN/MCTI. A maioria das ocorrências possui alta precisão horária. Os valores de chuva acumulada simples em intervalos 1 e 96 horas foram calculados automaticamente através do software *Análise_Pluviômetros_Cemaden* (Bortolozo et al., 2024). Seguindo o método adotado por Metodiev et al. (2018) para a região da Baixada Santista (Tabela 1) foram utilizadas as estações mais próximas das cicatrizes dos deslizamentos, limitadas com distância máxima de 2 km de raio. As distâncias entre as cicatrizes dos deslizamentos e as estações foram obtidas através do software *Distancia_Eventos_Estacoes_Cemaden* que automatiza o cálculo das distâncias entre as ocorrências de deslizamento e a rede de monitoramento do Cemaden.

N	Y	X	Horário (GMT)	Estação Mais Próxima - Código	Estação Mais Próxima - Nome	Distância (m)	Chuva Acumulada Simples 1h	Chuva Acumulada Meia Vida 1h	Chuva Acumulada Simples 96h	Chuva Acumulada Meia Vida 96h
898	7353183	376797	03/03/2020 00:50	351870115A	Perequê	2722	32,6	32,4	259,2	217,9
899	7353100	376778	03/03/2020 00:50	351870115A	Perequê	2709	32,6	32,4	259,2	217,9
900	7353049	376851	03/03/2020 00:50	351870115A	Perequê	2622	32,6	32,4	259,2	217,9
739	7348487	373481	03/03/2020 01:30	351870101G	Vila Baiana	1029	17,8	27,7	172,2	180,3
956	7353226	379188	03/03/2020 01:30	351870115A	Perequê	1103	36,4	45,1	288,6	246,3
957	7352652	379591	03/03/2020 01:40	351870115A	Perequê	594	40,4	49,1	297,6	254,9
831	7347856	374080	03/03/2020 01:50	351870101G	Vila Baiana	330	32,2	37,2	188,0	195,7
832	7346076	370891	03/03/2020 02:00	351870113A	Santo Antônio	484	16,9	27,3	177,5	203,4
865	7345465	370469	03/03/2020 02:00	351870113A	Santo Antônio	1193	16,9	27,3	177,5	203,4

Tabela 1 – Um extrato da planilha de correlação apresentando os parâmetros das ocorrências de deslizamento em relação das PCDs e dos acumulados de chuva simples e efetiva.

Para realizar as correlações foram adotados os modelos de correlação de Tatizana et al. (1987) e Yano (1990), que usam parâmetros de precipitação preparatória ou antecedente, definido como o volume de chuva acumulada total e efetiva em decorrência das chuvas incidentes antes da série de chuvas atual, ou seja, da precipitação imediata ou deflagradora. O tipo de cálculo meia-vida da chuva efetiva (desenvolvido por Yano, 1990 e descrito por Consoni et al., 2018) é uma metodologia



de cálculos de chuva efetiva análoga ao cálculo da meia-vida dos elementos radioativos. A chuva efetiva é um índice que representa o volume de água retida no solo aplicando um coeficiente de redução (Yano, 1990), sendo determinado para diferentes valores de meia-vida. A meia-vida é o período de tempo que representa os efeitos da chuva no passado ou seja, quanto maior a meia-vida, maior o volume de água acumulada no solo. Os cálculos da chuva acumulada efetiva meia-vida foram executados automaticamente utilizando o software *Analise_Meia_Vida_Chuva_Pluviometros_Cemaden* (Bortolozo et al., 2024) a partir dos índices de chuva provenientes da rede observacional do Cemaden/MCTI. Para a realização dos cálculos das chuvas sem ocorrência foi utilizada a PCD Automática do Cemaden/MCTI - Jardim São Miguel 351870120, para os índices de chuva simples/efetiva, contabilizando 59 eventos de chuva sem ocorrência (>2 mm/10 min) no período de 12/2019-11/2020.

Para realização da análise comparativa dos resultados da correlação foi adotado o método computacional estatístico de Análise de Cluster. Na elaboração dos gráficos de aglomeração de índices de chuva com e sem ocorrência foi utilizada a técnica da determinação de conjuntos de dados homogêneos que é obtida pela classificação hierárquica do tipo Ward. O agrupamento foi determinado utilizando o critério da distância euclidiana entre os acumulados de chuva a partir de agregação de conglomerados. No fim, foi realizada interpretação dos resultados comparando as aglomerações dos índices das chuvas acumuladas simples e efetiva meia-vida, bem como a sua relação com as envoltórias de referência estabelecidos por Tatizana et al. (1987) a partir dos gráficos elaborados através do programa Matlab.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando a sequência das chuvas acumuladas (96 h) para o período de dezembro de 2019 e de novembro de 2020 destacam-se os eventos de chuva do dia 10 de fevereiro e de 3 de março (Figura 2). O segundo é o maior evento climático extremo registrado na região com acumulado de chuva de 300 mm para quase 4 horas que causou 33 óbitos na cidade. Relacionando todas as 136 ocorrências de deslizamentos razos do evento de chuva supracitado nota-se uma maior aglomeração de ocorrências acima de 150 mm (Figura 2) dentro do intervalo de 21.50 h do dia 2 e 1.30 h do dia 3 de março de 2020. Durante o desastre de 2-3 de março de 2020 os acumulados de chuva simples e efetiva meia-vida causaram elevação da umidade do solo que atingiu valores

próximos da saturação do solo. Os altos acumulados de chuva efetiva durante todo o mês de fevereiro contribuíram para o aumento da umidade antecedente no solo e daí, na deflagração de quase todas as 136 ocorrências de deslizamento no Guarujá (Figura 2).

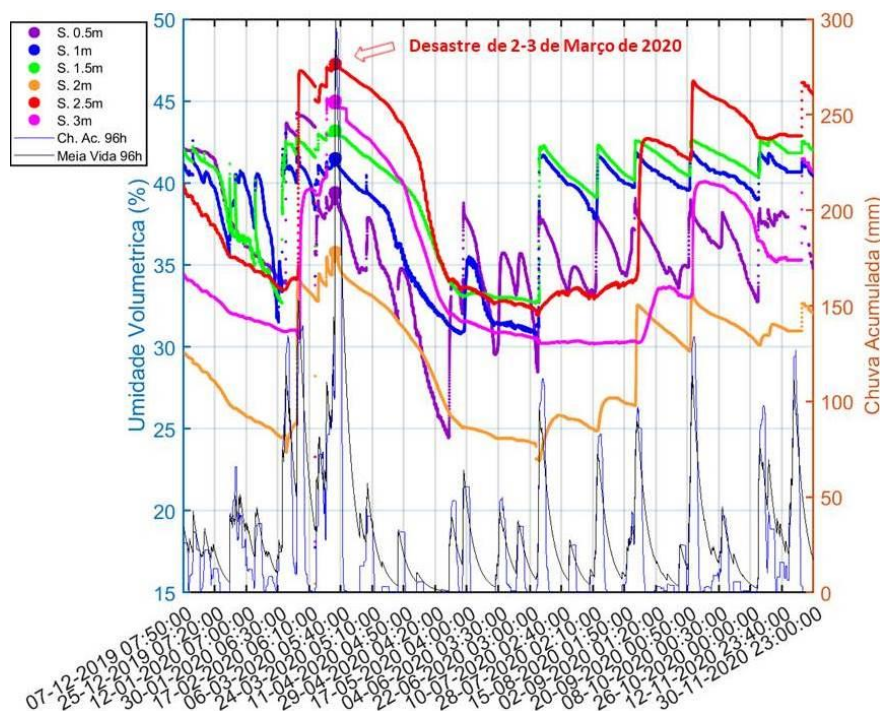


Figura 2 – Gráfico dos acumulados de chuva simples e efetiva meia-vida de 10 min e 96 h para o período de 12/2019 - 11/2020 apresentando o comportamento do teor da umidade do solo em 6 profundidades, a partir da PCD Geotécnica – Vila Baiana 351870101G.

Algumas das ocorrências possuem horários de deflagração exatamente iguais e por essa razão sobrepõem-se nos gráficos de correlação. Foram considerados os horários com registro sendo alguns generalizados pelo mapeamento pós-desastre da DC de Guarujá.

A seguir são apresentados os gráficos de correlação com a plotagem de todos os índices de chuva dentro do período 12/2019 - 11/2020 para município de Guarujá, efetuando a correlação entre chuva acumulada simples de 1 h (chuva imediata) e 96 h (chuva preparatória) com as 136 ocorrências de deslizamento, bem como as chuvas sem ocorrência. Assim foi possível estabelecer a linha de referência principal que separa de forma evidente as séries de chuvas associadas a ocorrências de deslizamento daquelas sem ocorrências (Metodiev et al., 2018). Praticamente, a Linha de Referência (LR) separa a Zona Segura (ZS) da Zona Insegura (ZIS) com maior precisão de 32 mm em 1 h e 90 mm em 96 h (Figura 3).

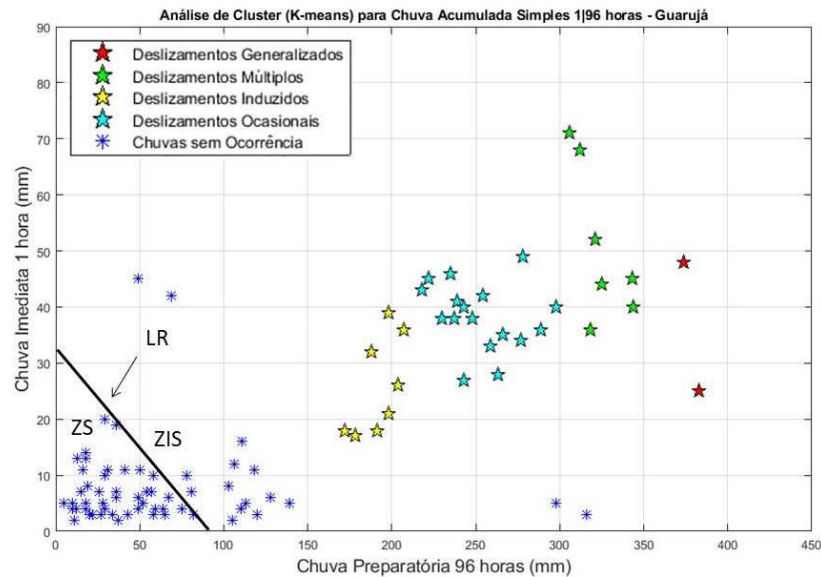


Figura 3 – Gráfico dos acumulados de chuva simples de 1 e 96 h entre 12/2019 e 11/2020 indicando a LR e os agrupamentos dos índices de chuva com ocorrência dentro da ZIS.

Através do programa Matlab foi feito agrupamento hierárquico automático dividindo conjuntos de aglomerações de acumulados de chuva com ocorrência com distâncias similares e assim colocando-os em posições próximas de níveis operacionais de alertas de deslizamentos. Também foram agrupadas as chuvas sem ocorrência que logicamente na sua maioria concentram-se abaixo da LR e dentro da ZS. Alguns desses eventos de chuva também ocorrem dentro da ZIS mostrando a complexidade desse processo ou seja, nem sempre dois ou mais eventos de chuva com intensidade, frequência e duração igual ou semelhante dentro da ZIS, cada um desses obrigatoriamente provocará deflagração de movimentos de massa. A seguir, foram traçadas as envoltórias de referência do Tatizana et al. (1987) posicionando os acumulados de chuva simples com e sem ocorrência dentro dessas curvas correspondendo aos cenários de deslizamentos induzidos, ocasionais (esparcos), múltiplos e generalizados (Figura 4). A figura 5 apresenta os pontos dos índices de chuva acumulada efetiva meia-vida de 1 hora (chuva deflagradora) e de 96 horas (chuva antecedente) usando os dados em tempo real dos pluviômetros em 10 min (Bortolozo et al., 2024). Essa figura sugere uma posição inferior da LR (30 mm/1 h e 85 mm/96 h) do que no gráfico de cálculo da chuva acumulada simples (Figura 3). No entanto, os cálculos do método meia-vida apresentaram uma melhor distribuição com um visível agrupamento dos índices de chuva com ocorrência e das chuvas sem ocorrência.

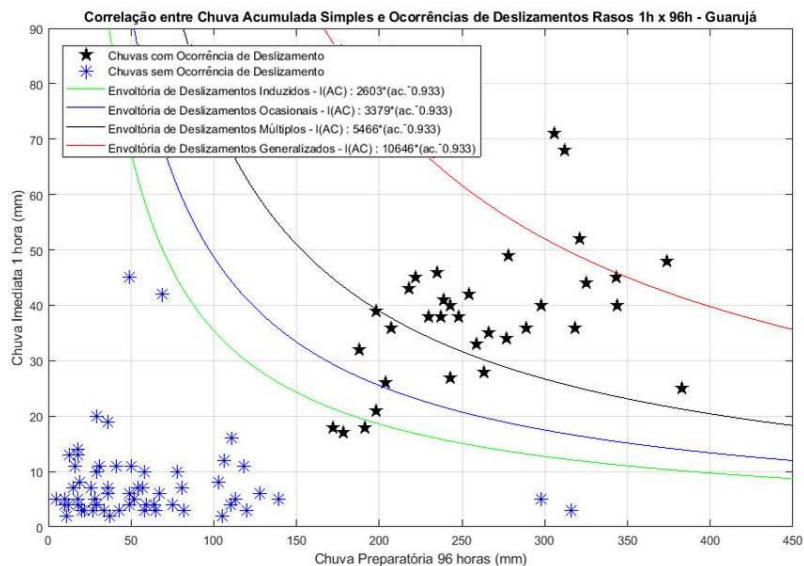


Figura 4 – Gráfico dos acumulados de chuva simples com e sem ocorrência de 1 e 96 h indicando as suas posições conforme as curvas de referência do Tatizana et al. (1987).

Através da análise de cluster dos 136 acumulados da chuva efetiva com ocorrência, nota-se que 91 ocorreram dentro da área de deslizamentos múltiplos e generalizados, 37 ocorrem como deslizamentos ocasionais e apenas 8 como induzidos.

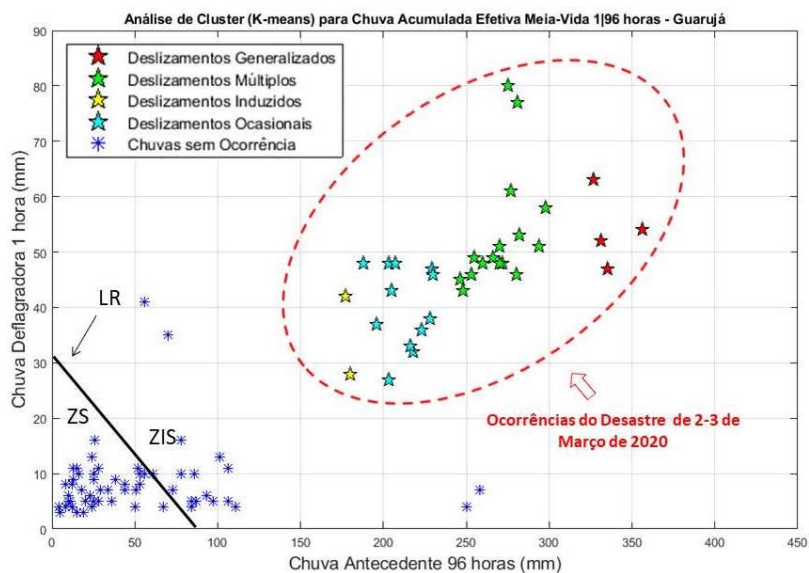


Figura 5 – Gráfico dos acumulados de chuva efetiva meia-vida de 1 e 96 h entre 12/2019 e 11/2020 indicando a LR e os agrupamentos dos índices de chuva com ocorrência dentro da ZIS.

A figura 6 indica que os índices de chuva com ocorrências do desastre de 2-3 de março apresentam posições menos elevadas e menos dispersas, conforme as curvas de

referência estabelecidas por Tatizana et al. (1987) que dividem esses índices em zonas de deslizamentos generalizados, múltiplos, ocasionais e induzidos.

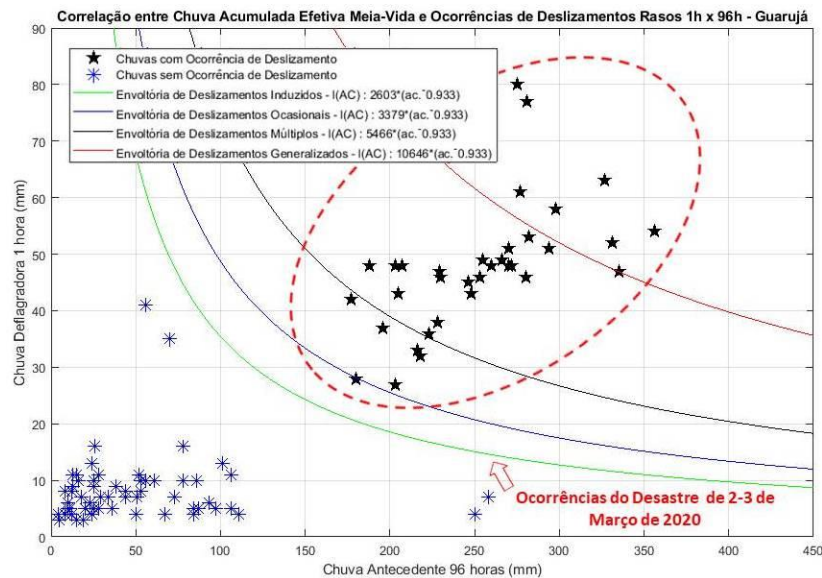


Figura 6 – Gráfico dos acumulados de chuva efetiva meia-vida com e sem ocorrência de 1 e 96 h indicando as suas posições conforme as curvas de referência do Tatizana et al. (1987).

Em geral, a análise de cluster dos acumulados de chuva efetiva meia-vida de 1 e 96 h, apresentou uma maior concentração dos agrupamentos dos índices de chuva com e sem ocorrência, bem como maior proximidade dos mesmos a linha X/Y do gráfico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interpretação dos resultados obtidos dos cálculos da chuva acumulada simples e efetiva meia-vida de 1 e 96 horas, revela a superioridade do segundo tipo de cálculo. Esse fato sugere a maior utilização dos índices da chuva efetiva para definição dos limiares críticos de chuva deflagradores de deslizamentos rasos, permitindo uma quantificação mais próxima da chuva antecedente retida no solo, aumentando assim a precisão e acurácia dos sistemas de alerta de deslizamentos.

Com a comparação dos gráficos de chuva acumulada simples e efetiva meia-vida elaborados através de análise automática de cluster no programa Matlab, fica evidente que esse método apresenta maior representatividade para os agrupamentos das ocorrências, dividindo e aglomerando-as em quatro grupos de deslizamentos induzidos, ocasionais, múltiplos e generalizados, posicionando-as corretamente entre as envoltórias de referência do Tatizana et al. (1987) elaboradas para a região da Baixada Santista.

Palavras-chave: Deslizamentos Translacionais Rasos, Análise de Cluster, Chuva Acumulada Simples, Chuva Acumulada Efetiva, Tipo de Cálculo Meia-Vida.



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho faz parte da pesquisa de doutorado do autor principal no PPG em Desastres Naturais do ICT da UNESP - CEMADEN/MCTI e foi realizado com apoio da FAPESP (processo nº 2024/16888-5), Carta Convite MCTI/FINEP/FNDCT (01/2016) e SAAMDT (CNPq nº44614220239). Agradecimentos para as Defesas Cíveis Municipal de Guarujá e do Estado de São Paulo pelos dados cedidos.

REFERÊNCIAS

BORTOLOZO, C. A. et al. **ARHCS (Automatic Rainfall Half-Life Cluster System): A Landslides Early Warning System (LEWS) Using Cluster Analysis & Automatic Threshold Definition**. International Journal of Geosciences, v. 15, p. 54-69, 2024.

CEMADEN. **Nota Técnica N°737/2020/SEI-CEMADEN**. 2020. (Relatório interno de pesquisa).

CONSONI, A. J. et al. **Manual Técnico para elaboração, transmissão e uso dos alertas de risco de movimentos de massa**. GIDES (JICA). CEMADEN/MCTI, v. 2, São José dos Campos/SP, 2018.

FREITAS, A. A. et al. **Meteorological conditions and social impacts associated with natural disaster landslides in the Baixada Santista region from March 2nd–3rd, 2020**. Urban Climate, v. 42, p. 101110, 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidade e Estados**. 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/guaruja.html>. Acesso: 08 jul. 2025.

METODIEV, D. et al. **Correlation between Rainfall and Mass Movements in North Coast Region of Sao Paulo State, Brazil for 2014-2018**. International Journal of Geosciences, v. 09, p. 669-679, 2018.

PELLEGATTI, C. H. G.; GALVANI, E. **Avaliação da precipitação na Serra do Mar – SP em eventos de diferentes intensidade e duração**. GEOUSP Espaço e Tempo (Online), São Paulo, Brasil, v. 14, n. 1, 147–158 p., 2010.

QUEIROZ, D. S. et al. **Challenges for the evaluation of sites of geological interest in urban areas: Baixada Santista, São Paulo state coast**. Anuário do Instituto de Geociências. v. 42, pp.129–144, 2019.

SANTORO, J. et al. **Correlação entre chuvas e deslizamentos ocorridos durante a operação do PPDC em São Paulo, SP**. In: VII SBCGG - 7º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, Maringá, Anais, pp. 1-15, 2010.

SOUSA, I. A. et al. **Development of a soil moisture forecasting method for a landslide early warning system (LEWS): Pilot cases in coastal regions of Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 131, 2023.

TATIZANA, C. O. et al. **Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos: Serra do Mar, município de Cubatão**. V Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 2, pp. 225-236. São Paulo: ABGE, 1987.

YANO, K. **Study of the Method for Setting Standard Rainfall of Debris Flow by the Reform of Antecedent Rain**. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 43, pp. 3-13, 1990.