Integração de Dados de Radar Meteorológico e Pluviômetros ao Modelo SHALSTAB para Análise de Escorregamentos Rasos

Elton John Robaina da Silva [1]; José Carlos Cesar Amorim [2] & Igor Paz [3]

Palavras-Chave – Radar Meteorológico, Pluviômetros, Escorregamentos Rasos.

INTRODUÇÃO

Eventos de precipitação extrema constituem um dos principais fatores desencadeadores de movimentos de massa em regiões montanhosas tropicais, especialmente em áreas como Angra dos Reis-RJ, onde a combinação entre relevo acidentado, elevados índices pluviométricos e ocupação de encostas favorece a ocorrência de escorregamentos rasos (PINHO; AUGUSTO FILHO, 2022). Nesse contexto, a utilização integrada de pluviômetros e radares meteorológicos permite obter estimativas quantitativas de precipitação mais representativas espacialmente, combinando a precisão das medições de superfície com a elevada resolução espacial e temporal do radar (OCHOA-RODRIGUEZ et al., 2019, PAZ et al., 2020, SILVA et al., 2022). Esses produtos constituem importantes dados de entrada para modelos hidrológicos e geotécnicos voltados ao monitoramento e à avaliação de áreas suscetíveis a desastres naturais.

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para identificação de áreas potencialmente suscetíveis a escorregamentos rasos utilizando dados dos radares meteorológicos Banda S operados pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), ajustados por pluviômetros da rede CEMADEN e integrados ao modelo *Shallow Landsliding Stability* (SHALSTAB), desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994). A abordagem combina informações de relevo, área de contribuição hidrológica, profundidade do solo e precipitação espacialmente distribuída para estimar condições de estabilidade de encostas durante eventos extremos de chuva.

METODOLOGIA

O presente estudo utilizou como dado de entrada o mosaico CAPPI a 2 km de altitude dos radares meteorológicos Banda S do INEA (SILVA, AMORIM e PAZ, 2023a, 2023b), adotado por sua representatividade da precipitação próxima à superfície, condição relevante para aplicações hidrológicas e geotécnicas (FABRY, 2015).

Os dados de radar foram submetidos a procedimentos de controle de qualidade para estimativa quantitativa de precipitação (QPE), incluindo correção de atenuação, filtragem adaptativa e remoção de ecos espúrios. A precipitação foi estimada por meio de uma abordagem híbrida Z–KDP, utilizando a refletividade corrigida (ZH) e o gradiente específico da fase diferencial (KDP), conforme proposto por Vulpiani et al. (2012), sendo posteriormente integrada em acumulados de 10 minutos. Em seguida, os campos de chuva foram ajustados com dados de 50 pluviômetros da rede CEMADEN para o evento de 01 de abril de 2022 em Angra dos Reis. Aplicou-se o Modelo de Erro Misto de Pfaff (2010), que combina correção do viés sistemático e Krigagem Ordinária dos erros residuais, considerando o acumulado de 10 minutos às 04:40 UTC.

1) Afiliação: Instituto Militar de Engenharia, elton.john@ime.eb.br, jcamorim@ime.eb.br, igorpaz@ime.eb.br

O DEM (JAXA, 2007), foi recortado para a área de estudo, reprojetado para o sistema SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S (EPSG:31983) e submetido a procedimentos de correção hidrológica visando eliminar inconsistências topográficas e garantir a continuidade do escoamento. A partir do modelo corrigido foram obtidos os parâmetros de declividade e área de contribuição utilizados pelo SHALSTAB. Os campos de precipitação ajustados por radar foram posteriormente compatibilizados com a resolução, projeção e extensão espacial do DEM, garantindo a integração entre os dados hidrológicos e topográficos empregados na análise de estabilidade das encostas.

Os campos de precipitação ajustados por radar foram convertidos de acumulados em 10 minutos (mm/10 min) para intensidade de recarga hídrica (ms^{-1}) e utilizados como variável de entrada do modelo SHALSTAB. Para a simulação foram adotados os parâmetros geotécnicos $c = 4{,}0\text{kPa}$, $\phi = 25°$, $\gamma_s = 18{,}0\text{kN}m^{-3}$, $\gamma_w = 9{,}81\text{kN}m^{-3}$ e condutividade hidráulica saturada $K_s = 7{,}52 \times 10^{-6} ms^{-1}$. A profundidade do solo foi considerada espacialmente variável, com valores entre 0,5 m e 3,0 m, estimados em função da declividade do terreno. O modelo foi então aplicado para calcular as condições de estabilidade das encostas a partir da interação entre topografia, propriedades geotécnicas e recarga hídrica, gerando classes de estabilidade e instabilidade. Por fim, o volume potencial de solo instável foi estimado pela multiplicação da profundidade do solo pela área de cada célula classificada como suscetível, permitindo quantificar espacialmente o material potencialmente mobilizável durante o evento analisado.

RESULTADOS

A Tabela 1 evidencia melhora consistente das estimativas após o ajuste por pluviômetros, com aumento das métricas de associação e eficiência e redução dos erros. O resultado indica maior concordância com as observações em superfície, proporcionando uma representação espacial da precipitação mais consistente com as condições observadas para aplicação no modelo SHALSTAB.

Tabela 1 - Comparação das métricas estatísticas entre as estimativas de precipitação por radar antes e após o ajuste por pluviômetros.

Métrica	Antes do ajuste	Após o ajuste
Corr	0,82	0,97
R^2	0,67	0,95
MAE (mm)	1,71	0,43
RMSE (mm)	2,88	1,17
NSE	0,61	0,94

A Figura 1 apresenta os principais produtos gerados pela metodologia proposta para o evento de 01 de abril de 2022 às 04:40 UTC em Angra dos Reis/RJ. O DEM hidrologicamente corrigido (Figura 1a) evidencia o relevo montanhoso característico da região, enquanto o campo de precipitação ajustado por pluviômetros (Figura 1b) mostra elevada variabilidade espacial da chuva, com os maiores acumulados concentrados na porção sul do município.

A aplicação do modelo SHALSTAB permitiu identificar áreas potencialmente suscetíveis a escorregamentos rasos (Figura 1c), resultando em uma área instável de aproximadamente 343,98 km². As regiões classificadas como instáveis concentram-se principalmente em encostas íngremes e áreas com maior contribuição hidrológica, enquanto as áreas estáveis estão associadas a terrenos menos declivosos.

O mapa de volume potencial de solo instável (Figura 1d) indica maior concentração de material mobilizável nas regiões montanhosas, totalizando aproximadamente $4{,}92 \times 10^8$ m³. Os resultados evidenciam áreas potencialmente suscetíveis a escorregamentos rasos sob as hipóteses adotadas pelo

modelo, demonstrando o potencial da integração entre dados de radar meteorológico ajustados por pluviômetros e o modelo SHALSTAB para aplicações de monitoramento e avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa.

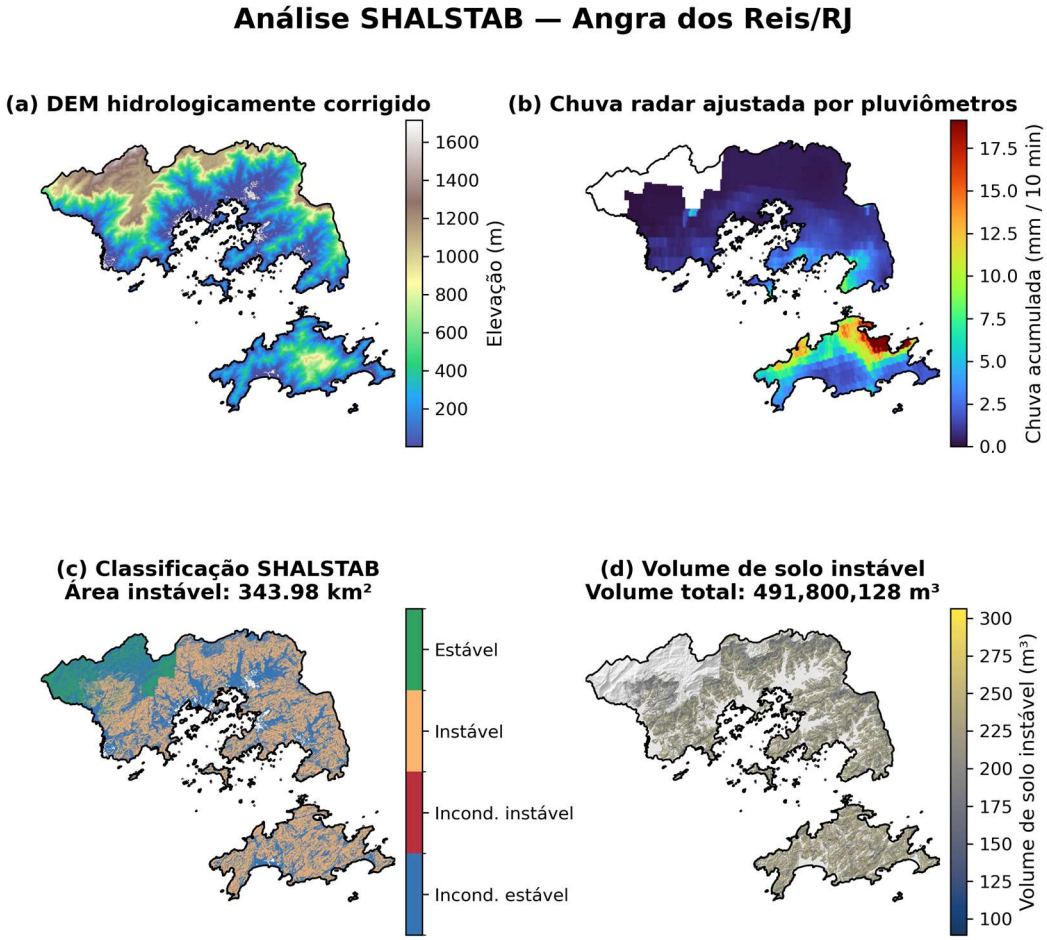


Figura 1 – Produtos gerados pela metodologia proposta para o evento de 01 de abril de 2022 às 04:40 UTC em Angra dos Reis/RJ: (a) Modelo Digital de Elevação (DEM) hidrologicamente corrigido após o condicionamento hidrológico do terreno; (b) campo de precipitação acumulada em 10 minutos obtido a partir do mosaico CAPPI 2 km dos radares meteorológicos Banda S do INEA e ajustado por pluviômetros da rede CEMADEN; (c) classificação de estabilidade das encostas produzida pelo modelo SHALSTAB, indicando áreas estáveis, instáveis, incondicionalmente estáveis e incondicionalmente instáveis; e (d) distribuição espacial do volume potencial de solo instável estimado a partir das áreas classificadas como suscetíveis a escorregamentos rasos.

CONCLUSÕES

A metodologia proposta demonstrou o potencial da integração entre dados de radar meteorológico, pluviômetros e o modelo SHALSTAB para a identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos rasos induzidos por chuva. Os resultados indicam que a utilização de campos de precipitação espacialmente distribuídos, obtidos a partir de radares e ajustados por pluviômetros, permite representar de forma mais realista a variabilidade espacial da chuva e sua influência sobre os processos de saturação do solo e estabilidade das encostas. A abordagem possibilitou a identificação de áreas potencialmente instáveis e a estimativa do volume de solo suscetível à mobilização durante eventos extremos, evidenciando o potencial dos radares meteorológicos como fonte de dados para sistemas de monitoramento e alerta de movimentos de massa em regiões montanhosas. Entretanto, a modelagem adotou simplificações relacionadas à representação espacial dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos, assumindo propriedades uniformes do solo em toda a área de estudo. Dessa forma, estudos futuros poderão incorporar informações geológicas, pedológicas e geotécnicas mais

detalhadas, além da validação dos resultados com inventários de escorregamentos observados, visando aumentar a representatividade física e a precisão das estimativas geradas pelo modelo.

REFERÊNCIAS

PINHO, T. M.; AUGUSTO FILHO, O. (2022). "*Landslide Susceptibility Mapping Using the Infinite Slope, SHALSTAB, SINMAP, and TRIGRS Models in Serra do Mar, Brazil*". Journal of Mountain Science, v.19, n.4, p.1018–1036. DOI: 10.1007/s11629-021-7057-z.

OCHOA-RODRIGUEZ, S.; WANG, L.; WILLEMS, P.; ONOF, C. A review of radar-rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications. Water Resources Research, John Wiley e Sons, Ltd, v. 55, p. 6356–6391, 8 2019. DOI: 10.1029/2018WR023332.

PAZ, I., TCHIGUIRINSKAIA, I., SCHERTZER, D. "Rain gauge networks' limitations and the implications to hydrological modelling highlighted with a X-band radar", Journal of Hydrology, v. 583, p. 124615, 1 abr. 2020. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2020.124615.

SILVA, E. J. R. da; ALVES, C. N.; CAMPOS, P. C. de O.; OLIVEIRA, R. A. A. C. e; MARQUES, M. E. S.; AMORIM, J. C. C.; PAZ, I. (2022). *"Comparison of Rain Gauge Network and Weather Radar Data: Case Study in Angra dos Reis, Brazil"*. Water, v.14, n.23, artigo 3944. DOI: 10.3390/w14233944.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, American Geophysical Union, v. 30, p. 1153–1171, 1994. DOI: 10.1029/93WR02979

SILVA, E. J. R.; AMORIM, J. C. C.; PAZ, I. (2023a). "Bloqueio de Feixe de Radar Meteorológico em Evento Extremo: Análise com PPI" in Anais do III Encontro Nacional de Desastres, Niterói, RJ, Brasil, 2023.

SILVA, E. J. R.; AMORIM, J. C. C.; PAZ, I. (2023b). "Bloqueio de Feixe de Radar Meteorológico em Evento Extremo: Análise com CAPPI" in Anais do III Encontro Nacional de Desastres, Niterói, RJ, Brasil, 2023.

FABRY, F. Radar meteorology: Principles and practice. *Radar Meteorology: Principles and Practice*, Cambridge University Press, p. 1–256, 1 2015.

VULPIANI, G.; MONTOPOLI, M.; PASSERI, L. D.; GIOIA, A. G.; GIORDANO, P.; MARZANO, F. S. (2012). "On the Use of Dual-Polarized C-Band Radar for Operational Rainfall Retrieval in Mountainous Areas". Journal of Applied Meteorology and Climatology, v.51, p.405–425.

PFAFF, T. (2010). "Radargestützte Schätzung von Niederschlagsensembles" in BADER, J. et al. (Ed.). Operationelle Abfluss- und Hochwasservorhersage in Quellgebieten. Final Project Report, p.113–118.

JAXA. Advanced Land Observing Satellite (ALOS) PALSAR Dataset. Tokyo: Japan Aerospace Exploration Agency, 2007.