

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

DETECÇÃO DE CICATRIZES DE DESLIZAMENTOS PÓS-INUNDAÇÃO COM GOOGLE EARTH ENGINE: ANÁLISE INTEGRADA COM NDVI E DECLIVIDADE NA REGIÃO DA QUARTA COLÔNIA (RS)

Christhian Santana Cunha¹; Marcos Aurélio Machado²; Luana Lavagnoli Moreira³; Clódis de Oliveira Andrade-Filho⁴; Lorenzo Fossa Sampaio Mexias⁵;

Abstract: This study investigated landslide scars in Quarta Colônia, RS, following the May 2024 flood, using an integrated approach combining NDVI, slope, and elevation in Google Earth Engine (GEE). NDVI analysis before, during, and after the event enabled the identification of areas with vegetation loss. The methodology applied slope ($\geq 20^\circ$) and elevation (≥ 150 m) criteria to refine landslide scar detection, resulting in accurate maps of the affected areas. Validation was conducted using high-resolution satellite images, confirming the method's accuracy. This study contributes to post-disaster monitoring and provides a practical tool for identifying and quantifying risk areas in landslide-prone regions, supporting environmental management and risk mitigation.

Resumo: Este estudo investigou cicatrizes de deslizamentos na Quarta Colônia, RS, após a inundaçāo de maio de 2024, utilizando uma abordagem integrada de NDVI, declividade e elevação no Google Earth Engine (GEE). A análise do NDVI antes, durante e após o evento permitiu identificar áreas com perda de vegetação. A metodologia aplicou critérios de declividade ($\geq 20^\circ$) e elevação (≥ 150 m) para refinar a detecção das cicatrizes de deslizamento, resultando em mapas precisos das áreas afetadas. A validação foi realizada com imagens de satélite de alta resolução, comprovando a precisão do método. Essa abordagem integrada automatiza e acelera a detecção de cicatrizes, reduz custos de mapeamento em campo, permite o monitoramento contínuo de grandes áreas e pode ser adaptada a diferentes contextos geográficos. Com isso, este trabalho contribui para o monitoramento pós-desastres naturais e oferece uma ferramenta prática para identificar e quantificar áreas de risco em regiões suscetíveis a deslizamentos, auxiliando na gestão ambiental e na mitigação de riscos.

Palavras-Chave – imagens de satélite, índices espectrais, movimento de massa.

INTRODUÇÃO

As inundações são fenômenos naturais que ocorrem quando o acúmulo excessivo de água em uma área excede a capacidade de absorção do solo e das infraestruturas locais. Em regiões habitadas,

1) AmbGEO, São Gabriel-RS, contato@ambgeo.com

2) AmbGEO, São José-SC, contato@ambgeo.com

3) AmbGEO, Aracruz-RS, contato@ambgeo.com

4) Instituto de Geociências (IGeo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR) - Grupo de Pesquisa LATITUDE (UFRGS/CNPq), Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), Porto Alegre-RS, clodis.filho@ufrgs.br

5) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR), Porto Alegre-RS, lorenzomexias@yahoo.com.br

essas inundações podem desencadear desastres de grandes proporções, impactando severamente as comunidades afetadas (Soumyashree et al., 2022). Em regiões montanhosas ou de alta declividade, inundações intensas aumentam a saturação do solo, reduzindo a coesão entre as camadas superficiais e subsuperficiais. Esse processo enfraquece a estrutura do terreno, facilitando o desprendimento de porções de solo e vegetação e resultando na formação de cicatrizes de deslizamento (Kobiyama et al., 2018).

Nos últimos anos, o Brasil tem registrado um aumento na frequência e intensidade de desastres naturais, como inundações e deslizamentos. Esse crescimento está ligado tanto às mudanças climáticas, que ampliam as chuvas extremas, quanto ao uso inadequado do solo, aumentando a vulnerabilidade em regiões suscetíveis (Alves et al., 2020). Em maio de 2024, o Rio Grande do Sul enfrentou um dos eventos de inundações mais severos de sua história, com áreas rurais e urbanas inundadas e múltiplos deslizamentos de terra. O desastre afetou 471 cidades, resultando em mais de 170 mortes e deslocando cerca de 600 mil pessoas (G1, 2024). A região da Quarta Colônia, caracterizada por terrenos montanhosos e declividades acentuadas, foi especialmente afetada por deslizamentos, devido à maior suscetibilidade do solo ao acúmulo de água e instabilidade em áreas inclinadas (Schirmer et al., 2024).

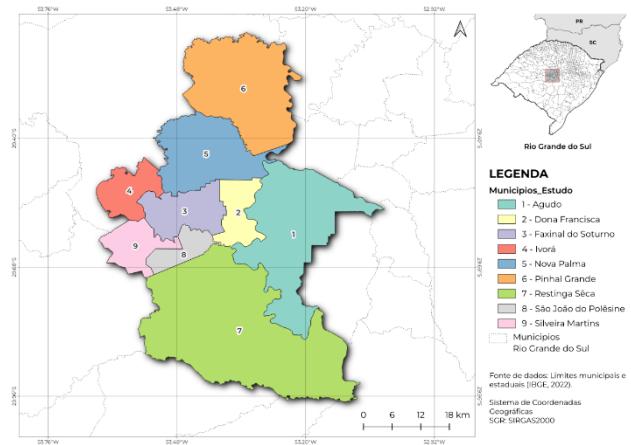
A detecção de cicatrizes de deslizamentos após uma inundação, como na Quarta Colônia, RS, envolve a combinação de variáveis de cobertura da terra e características do relevo. O NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), que indica a densidade de vegetação, ajuda a identificar áreas onde houve perda ou alteração na cobertura vegetal, sinalizando possíveis zonas de deslizamento (Doan et al., 2022). A elevação permite diferenciar áreas de risco, pois terrenos mais altos podem ter diferentes níveis de instabilidade. Já a declividade revela a inclinação do solo, onde maiores declives aumentam a probabilidade de deslizamento (Antonio et al., 2022). Ao integrar essas variáveis no Google Earth Engine (GEE), que processa imagens de satélite de alta resolução, é possível delimitar as áreas afetadas de forma mais precisa e eficiente.

Assim, este estudo tem como objetivo detectar cicatrizes de deslizamentos na região da Quarta Colônia (RS) por meio da análise integrada de NDVI e características do relevo. Essa abordagem permite uma compreensão das condições pós inundaçao e fortalece estratégias de monitoramento e resposta a desastres naturais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi aplicado na região da Quarta Colônia, localizada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, abrangendo os municípios de Agudo, Dona Francisca, Ivorá, Pinhal Grande, Faxinal do Soturno, Nova Palma, Restinga Seca, São João do Polêsine e Silveira Martins (Figura 1). A área foi gravemente impactada pelo mais intenso evento de inundaçao já registrado no estado, ocorrido em maio de 2024 (DIÁRIO DE SANTA MARIA, 2024). Todas as análises realizadas neste estudo foram conduzidas na plataforma Google Earth Engine (GEE).

Figura 1 – Localização da área de estudo.



Para identificar cicatrizes de deslizamentos provocadas pelo evento de inundação, foram combinadas variáveis específicas: declividade do terreno igual ou superior a 20 graus, elevação igual ou maior que 150 metros e variação de NDVI, entre os eventos pré e pós inundação, acima de 0,15. Para obter essa variação de NDVI, foi criada uma máscara de NDVI maior e igual a 0,7 tanto para o período pré-inundação quanto para o pós-inundação. Em seguida, foi calculada a diferença entre essas máscaras. A partir dessa combinação de variáveis, foi gerada uma máscara que permitiu delimitar e mensurar as áreas afetadas.

O NDVI foi obtido a partir de imagens da coleção Planet NICFI para as Américas, com resolução espacial de 4,77 metros, aplicando filtros de data para três cenários distintos: pré-inundação (março/2024), durante a inundação (maio/2024) e pós-inundação (junho/2024). Para calcular a declividade e obter os valores de elevação, foi utilizado o modelo digital de elevação ALOS DSM, com resolução espacial de 30 metros.

Por fim, as áreas das cicatrizes foram validadas com base nas delimitações obtidas no estudo de Andrade Filho [9], que utilizou interpretação visual de imagens de satélite de alta resolução espacial. Este estudo contou com imagens dos satélites WorldView, fornecidas pela National Geospatial Intelligence Agency (NGA), com resolução espacial entre 0,3 e 0,4 metros, além de imagens dos sistemas EROS C e BlackSky (resolução espacial de 0,9 metros), cedidas pelas Forças Aéreas do Chile e do Brasil. Foram também utilizadas imagens do satélite CBERS-4, com resolução de 2 metros, processadas com técnica de pansharpening, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

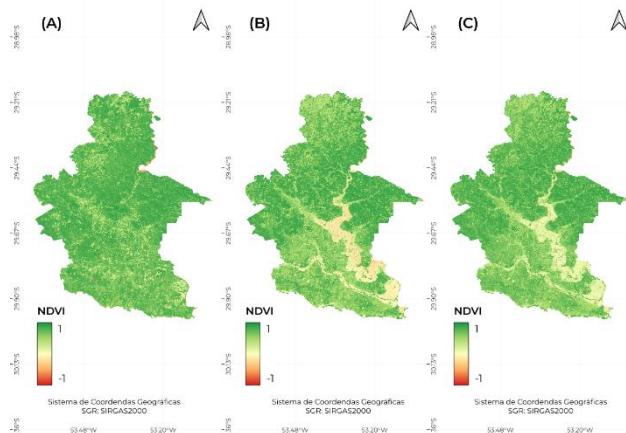
A validação desses dados foi realizada cruzando as cicatrizes de deslizamento identificadas neste estudo com aquelas mapeadas por Andrade Filho (2024), resultando em uma matriz de erro ou confusão. Essa matriz possibilitou uma avaliação detalhada da precisão e correspondência entre as duas bases, permitindo identificar discrepâncias ou padrões de erro que destacam a confiabilidade e a consistência dos dados analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme observado na Figura 2, a aplicação do NDVI revelou uma redução significativa nos valores durante a inundação (tons de amarelo), especialmente ao longo dos cursos d'água, refletindo a perda de vegetação devido à presença de água e possíveis deslizamentos em áreas íngremes. Em contraste, o cenário pré-inundação apresenta altos valores de NDVI (tons de verde), indicando uma cobertura vegetal densa e saudável. No período pós-inundação, observa-se uma recuperação parcial

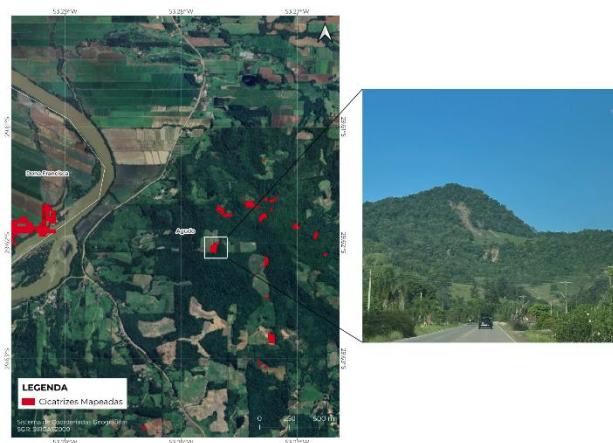
da vegetação; contudo, algumas áreas mantêm baixos valores de NDVI, sugerindo a presença de cicatrizes de deslizamento e exposição do solo, indicando uma recuperação vegetativa lenta.

Figura 2 – NDVI para os cenários pré (A), durante (B) e pós-inundação.



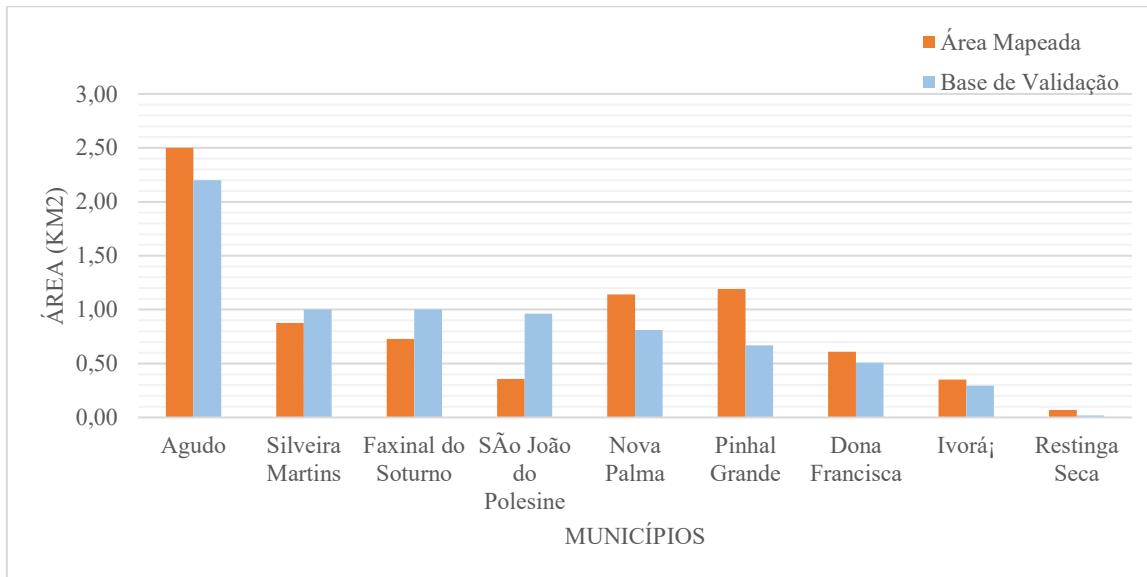
Através da combinação das máscaras de NDVI, relevo e declividade, foi possível detectar e delimitar cicatrizes de deslizamentos ao longo da região de estudo. Essas áreas foram identificadas e mensuradas com precisão, conforme ilustra a Figura 3, que apresenta um exemplo de cicatriz de deslizamento com sua foto real no município de Agudo.

Figura 3 – Cicatriz identificada no mapa e na foto real.



Na Figura 4 são comparadas as áreas de deslizamentos identificadas por NDVI (em azul) com as áreas validadas em campo (em laranja) para diferentes municípios, expressas em quilômetros quadrados (km²). Observa-se que em alguns municípios, como Agudo e Nova Palma, a área detectada pelo NDVI supera a área validada, indicando uma possível superestimativa do método baseado no índice de vegetação. Por outro lado, em São João do Polêsine e Silveira Martins, a área validada é maior do que a detectada, sugerindo que o NDVI pode não ter capturado completamente todas as áreas de deslizamento. Esses resultados evidenciam a variabilidade da precisão do NDVI entre os municípios, destacando a importância de complementar essa análise com validações em campo para maior precisão na delimitação das cicatrizes de deslizamento.

Figura 4 – Comparação de áreas de NDVI e validação por município (km²).



O método apresentado mostrou-se eficaz possibilitando a detecção de mudanças na cobertura de solo. Refletindo a perda de vegetação e o surgimento de cicatrizes de movimentos de massa. A metodologia proposta pode ser utilizada para identificação inicial de áreas atingidas, bem como delineamento. Contudo, devido a diferenças encontradas nos tipos de movimentos de massa e características da geomorfologia do terreno a utilização de limiares fixos de declividade, elevação ou, no caso da vegetação, de índices fenológicos pode levar a um delineamento de áreas que não representam cicatrizes dos deslizamentos, ou não mapear de forma completa um movimento de massa. Uma possível solução seria a utilização de limiares adaptativos com base em histogramas de frequências, ou a utilização de modelos de aprendizado de máquina para considerar diferentes amostras, textura e o contexto das áreas afetadas.

Sajadi et al. (2021) identificaram cicatrizes de deslizamentos de terra indiretamente no Planalto TibetanoQinghai, na China, usando séries temporais de NDVI obtidas de sensores como AVHRR, MODIS e Landsat. A validação concentrou-se na consistência interna dessas séries e na capacidade dos sensores de detectar anomalias no NDVI, sem o uso de imagens de alta resolução ou dados de campo para confirmar a ocorrência real dos deslizamentos nas áreas indicadas. Essa abordagem, diferente deste estudo, pode limitar a precisão dos resultados ao não validar diretamente as cicatrizes de deslizamento detectadas.

Zhong et al. (2019) discutem os principais desafios no mapeamento de deslizamentos com sensoriamento remoto, destacando a falta de características espectrais únicas para identificar deslizamentos, a ampla variabilidade geológica e geomorfológica, a dificuldade em detectar áreas cobertas por vegetação e as limitações de resolução das imagens. Além disso, apontam que a insuficiência e a qualidade dos dados de treinamento prejudicam a precisão dos algoritmos de detecção. O estudo sugere que o uso de tecnologias como LiDAR e aprendizado profundo pode ajudar a superar esses obstáculos, aumentando a automação e a precisão na identificação de deslizamentos.

A análise realizada utilizando a máscara de NDVI e a base de dados de validação Andrade Filho (2024), resultou em uma matriz de confusão que compara a presença e ausência de cicatrizes de deslizamentos identificadas a partir do NDVI com as áreas definidas na base de validação. A matriz

mostra um desempenho de classificação elevado, com uma acurácia geral de 99,74%, indicando que o modelo tem uma forte capacidade de classificar corretamente as áreas afetadas e não afetadas. No entanto, a precisão do usuário para a classe de cicatrizes (classe 1) é significativamente mais baixa (33,33%) em comparação com a precisão da classe de ausência de cicatrizes (classe 0), que apresenta um valor de quase 100%. Isso sugere que, enquanto o modelo é confiável para classificar a maioria dos pixels como ‘não cicatriz’, ele apresenta certa dificuldade em identificar com precisão todos os pixels que realmente representam ‘cicatrizes de deslizamento’.

Além disso, a sensibilidade, ou taxa de acerto para as classes, apresenta distinções entre as categorias: enquanto a classe de ausência de cicatrizes (0) atinge uma sensibilidade muito alta de 99,88%, a classe de cicatrizes (1) alcança apenas 30%. Estima-se que esta baixa sensibilidade para cicatrizes indica que há uma quantidade significativa de pixels com cicatrizes que o modelo não identificou, o que pode estar relacionado a limitações nas características espectrais do NDVI para diferenciar cicatrizes em certas condições.

CONCLUSÃO

Este estudo mapeou cicatrizes de deslizamentos provocados pela intensa inundação de maio de 2024 na região da Quarta Colônia, no Rio Grande do Sul, por meio de uma análise integrada de NDVI, declividade e elevação. A abordagem, baseada em dados do Google Earth Engine, foi eficaz no mapeamento das áreas afetadas, validada por imagens de alta resolução e análise visual.

Neste sentido, destaca-se que o uso de sensoriamento remoto para detectar cicatrizes de deslizamentos é eficaz, mas enfrenta desafios na precisão e adaptabilidade dos métodos. O estudo da Quarta Colônia demonstrou a eficácia de uma abordagem integrada com NDVI, declividade e elevação para identificar cicatrizes em áreas específicas, mas também destacou as limitações dos limiares fixos, que podem gerar mapeamentos imprecisos em terrenos com variabilidade geomorfológica. A sugestão de limiares adaptativos e o uso de aprendizado de máquina podem representar um avanço na detecção, considerando as texturas e contextos únicos das áreas afetadas.

Contudo, visando aumentar a acurácia do modelo e precisão das cicatrizes mapeadas, com base nos resultados obtidos é necessário aprimorar o método proposto com a implementação de outros índices, utilização de limiares adaptativos ou modelos de aprendizado de máquina.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. M.; SILVA, R. M. (2020). “Mudanças climáticas e eventos extremos: impactos e desafios para a gestão de riscos de desastres no Brasil”. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(2), pp. 345-362.
- ANDRADES FILHO, C. O.; MEXIAS, L. S. F. (Orgs.). (2024). *WebMapa de Movimentos de Massa para equipes de apoio na situação de calamidade - RS - Maio de 2024*. Lab. Latitude – CEPSRM/PPGSR / DEGD | IGeo | UFRGS.
- ANTONIO, G.; MARIO, E.; D'AMBROSIO, E.; TRIPALDI, S.; CAPRA, G. F.; GENTILE, F.; SANESI, G. (2022). “Assessing Landslide Susceptibility by Coupling Spatial Data Analysis and Logistic Model”. *Sustainability*.

DIÁRIO DE SANTA MARIA. (2024). “Medo, angústia e incerteza: moradores da Quarta Colônia tentam voltar à rotina em meio aos traumas causados pelas enchentes”. Disponível em: <https://diariosm.com.br/noticias/geral>. Acesso em: 29 out. 2024.

DOAN, L. V.; NGUYEN, B.-Q.-V.; PHAM, T. H.; NGUYEN, C. C.; NGUYEN, T. C. (2022). “Effect of time-variant NDVI on landslide susceptibility: A case study in Quang Ngai province, Vietnam”. *Open Geosciences*, 15.

G1 RIO GRANDE DO SUL. (2024). “Um mês de enchentes no RS: veja cronologia do desastre”. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs>. Acesso em: 29 out. 2024.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; FAN, F. M.; CORSEUIL, C. W.; MICHEL, G. P.; DULAC, V. F. (2018). “Abordagem integrada para gerenciamento de desastre em região montanhosa com ênfase no fluxo de detritos”. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 7(2), pp. 31-65.

SAJADI, P.; SANG, Y.-F.; GHOLAMNIA, M.; BONAFONI, S.; BROCCA, L.; PRADHAN, B.; SINGH, A. (2021). “Performance Evaluation of Long NDVI Timeseries from AVHRR, MODIS and Landsat Sensors over Landslide-Prone Locations in Qinghai-Tibetan Plateau”. *Remote Sensing*, 13, p. 3172.

SCHIRMER, G. J.; ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R. (2024). “Análise das restrições ambientais envolvendo o uso da terra, a hidrografia e os atributos do relevo na região da Quarta Colônia-Rio Grande do Sul com o uso de geotecnologias”. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul*, 43, pp. 9-32.

SOUMYASHREE, B.; TILLIHAL, A. K.; SHUKLA. (2022). “Flood Disaster Hazards: A State-of-the-Art Review of Causes, Impacts, and Monitoring”, in *Advances in Geographical and Environmental Sciences*.

ZHONG, C.; LIU, Y.; GAO, P.; CHEN, W.; LI, H.; HOU, Y.; MA, H. (2019). “Landslide mapping with remote sensing: challenges and opportunities”. *International Journal of Remote Sensing*, pp. 1-27.