

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/197

Deep Learning Aplicada a Segmentação Semântica Semiautomática de Cicatrizes de Deslizamentos de Terra: Aspectos Geotécnicos

Pedro Eugênio Gomes Boehl

Professor/Pesquisador e Líder do Grupo de Pesquisas de Geologia de Engenharia e Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Erechim, Erechim/RS, Brasil, pedro.boehl@uffs.edu.br

Mateus Bruschi

Engenheiro Ambiental e Sanitarista, Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Erechim, Erechim/RS, Brasil, matebruschi@hotmail.com

Mauro Leandro Menegotto

Professor/Pesquisador, Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Chapecó, Chapecó/SC, Brasil, mauro.menegotto@uffs.edu.br

José Mario Vicensi Grzybowski

Professor/Pesquisador, Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Erechim, Erechim/RS, Brasil, jose.grzybowski@uffs.edu.br

RESUMO: A cada ano os desastres naturais são responsáveis por inúmeras perdas para a sociedade, tanto econômicas quanto sociais. Deslizamentos de terra são desastres que podem ser causados por fatores naturais ou antrópicos. Este trabalho tem como objetivo abordar os aspectos geotécnicos de uma metodologia de mapeamento de cicatrizes de deslizamentos, por meio de redes neurais totalmente convolucionais, para a detecção e aprendizado de reconhecimento dessas cicatrizes e, assim, produzir e disponibilizar um banco de dados de deslizamento de alta confiabilidade para os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Inicialmente, a rede neural passou por um processo de treinamento, onde seus parâmetros foram ajustados através de imagens de satélite amostradas, que continham as máscaras associadas as cicatrizes de deslizamento. Essas cicatrizes, foram geradas a partir dos pixels de contorno que delimitavam o solo exposto visível decorrente de cada deslizamento. Posteriormente, foi realizada a triagem manual dos pontos de deslizamento obtidos da etapa anterior e os melhores pontos foram submetidos a análise de um engenheiro geotécnico, para a confirmação definitiva desses pontos como cicatrizes de deslizamento. O inventário de deslizamento possibilitou o desenvolvimento de mapas de suscetibilidade de deslizamentos, que pode servir como primeiro passo para o desenvolvimento de sistemas de alertas de risco e prevenção, reduzindo assim as consequências negativas desse tipo de desastre na sociedade.

PALAVRAS-CHAVE: Movimentos de massa. Inventário de deslizamentos. Imagens de satélite. Redes neurais.

ABSTRACT: Each year, natural disasters are responsible for countless losses to society, both economically and socially. Landslides are disasters that can be caused by natural or anthropic factors. The purpose of this work is to apply a methodology of landslide scars mapping, based on the application of fully convolutional neural networks, to detect and learn how to map landslide scars, and from that, to produce and make a publicly available and highly reliable landslide database for Rio Grande do Sul, Santa Catarina and Paraná States. Initially, the neural network was trained, with its parameters adjusted using sampled satellite images that contained the masks associated with the landslide scars. These scars were generated from the contour pixels that delimited the visible exposed ground resulting from each landslide. Subsequently, the landslide points obtained from the previous step were manually sorted, and the best ones were submitted for geotechnical engineer analysis, to confirm those as definitive landslide scars. This database can make possible the

development of landslide susceptibility maps, and be the first step of the development of alert and prevention system. This way, the negative consequences of this kind of disaster on society can be reduced.

KEYWORDS: Mass movements. Landslide inventory. Satellite imagery. Neural networks.

1 INTRODUÇÃO

Deslizamentos de terras são desastres que ocorrem devido a diversos fatores, alguns naturais, como a declividade, a elevação e o tipo de material geotécnico no local, e outros antropológicos, como o desflorestamento e o uso incorreto do solo, entre outros. No Brasil, os desastres que acontecem com mais frequência, atingindo o maior número de pessoas, são as inundações e os deslizamentos. Os danos sofridos em virtude destes acontecimentos causam grandes impactos econômicos e sociais, podendo ainda resultar em fatalidades. A parcela mais afetada da população é a menos privilegiada economicamente que, com a expansão urbana desenfreada, por vezes acaba se marginalizando em zonas impróprias para a ocupação (Tavares, 2010).

Em 2023, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN (2023) registrou 1.161 desastres, desses 716 registros de ordem hidrológica e 445 geológicas, sendo ainda emitidos 3.425 alertas. Neste mesmo ano ocorreram deslizamentos de terra em São Sebastião (SP), com 64 mortes, e no Vale do Taquari (RS), que registrou 53 mortes e 5 pessoas desaparecidas, sendo que ambos não foram ocorrências isoladas, pois também aconteceram desastres na Serra Gaúcha, em Minas Gerais, em São Paulo, no Rio de Janeiro, no Vale do Itajaí, Petrópolis, entre outros. Segundo o CEMADEN (2023), as ocorrências seguiram o padrão de concentração em capitais e regiões metropolitanas. O levantamento mostrou que a maior parte está localizada na faixa leste do país. É consenso que a elevação da temperatura média global em 1,45 °C, no ano de 2023, acima dos níveis pré-industriais (1850-1900), estão contribuindo globalmente para a intensificação de chuvas e enxurradas, intensificação de ciclones extratropicais com potencial destrutivo, mortes e prejuízos econômicos.

O mapeamento de suscetibilidade de deslizamentos é um passo importante para mitigar os riscos desse tipo de desastres e minimizar as consequências, tanto econômicas quanto sociais que eles podem causar (Vanâcor e Rolim, 2012). Entretanto, muitos modelos utilizados para realizar esse mapeamento dependem da existência de um inventário de cicatrizes para a sua validação. Os mapas devem conter a localização, a forma, as datas de ocorrência, os limites e devem estar registrados e disponíveis para serem acessados em plataformas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (Hervás e Bobrowsky, 2009). Esses mapas são muitas vezes escassos, uma vez que o processo para a sua elaboração depende de profissionais qualificados, e a sua metodologia de elaboração não é muito bem definida, por vezes até mesmo subjetiva (Soares, 2022).

Esses mapas podem ser elaborados de três formas: manual, semiautomática e automática. Os métodos manuais dependem da obtenção de dados de campo e da interpretação desses dados por especialistas qualificados. Os outros dois métodos utilizam classificação através de algoritmos baseados em pixel e objetos (Soares, 2022).

Os métodos de classificação supervisionada e não-supervisionada, detecção de mudanças e segmentação baseada em um *threshold*, se destacam na abordagem baseada em pixel. Eles desconsideram fatores importantes, como informações geométricas e contextuais das imagens, o que explica o porquê deles muitas vezes não obterem uma boa precisão, apesar de serem os mais utilizados (Stumpf e Kerle, 2011; Zhong et al., 2019; Prakash et al., 2020). Uma maneira de obter resultados com uma precisão maior são os métodos baseados em objetos, que consideram informações, como as espaciais, espectrais e morfológicas que são analisadas por um especialista, reduzindo assim o ruído na classificação (Soares, 2022).

Com o avanço da tecnologia, os métodos quantitativos, ou objetivos, se mostram como uma alternativa viável aos métodos qualitativos, ou subjetivos. Com a capacidade de processamento dos computadores modernos, é possível realizar o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos com rapidez e eficiência. Nos métodos de aprendizagem de máquina (AM), alguns trabalhos de destaque conseguem atingir mais de 85% de precisão para detectar áreas suscetíveis a deslizamentos (Gameiro, 2020). Um estudo comparativo entre os modelos de AM, realizado por Pourghasemi e Rahmati (2018), demonstrou que as técnicas com a maior precisão são as de Florestas Aleatórias, Máquina de Vetores de Suporte e as ANNE, apesar disso, a escolha da técnica mais apropriada deve ser realizada com base nas características do local de estudo.

Técnicas capazes de elaborar mapas de suscetibilidade a deslizamentos podem servir como importantes ferramentas para o estabelecimento de sistemas de alerta precoce (SAP). O sistema norueguês de previsão e alerta de deslizamentos de terra induzidos pela chuva e derretimento de gelo, utiliza o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos, com base em modelos aditivos generalizados, em conjunto com sistemas de monitoramento em tempo real de dados hidrometeorológicos e modelos hidrológicos, para identificar situações de risco até 66 horas antes delas ocorrerem. Com essa informação, as autoridades conseguem tomar ações preventivas para diminuir os impactos destes desastres (Krøgli et al, 2018).

Em suma, dentro do exposto, este trabalho teve como objetivo principal gerar e disponibilizar uma base de dados confiável de cicatrizes de deslizamentos de terra na Região Sul, do Brasil, utilizando uma rede neural convolucional U-Net e um processo de triagem manual.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização do local de estudo

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), a Região Sul possui 3.042 áreas de risco a deslizamentos, sendo a maioria das áreas localizadas no estado de Santa Catarina. Dos 1.190 municípios, 154 são monitorados pelo CEMADEN (2022), por possuírem histórico de desastres naturais decorrentes de movimento de massa ou de processos hidrológicos. É uma região muito afetada pelo desmatamento, com pouca vegetação nativa restante. O clima da região é subtropical ou temperado, com chuvas bem distribuídas durante o ano. A região de análise é muito ampla sendo de difícil sintetização geológica. Em termos mais amplos, pode-se dizer, que a estrutura geológica do Brasil é constituída por escudos cristalinos, bacias sedimentares e terrenos vulcânicos, sem dobramentos modernos. Em termos de América do Sul, a Região Sul do Brasil está sobre o cráton Rio de La Plata. Na maior parte dessa região, numa sequência de leste a oeste, afloram os sedimentos recentes do litoral, a faixa de rochas plutônicas ácidas e metamórficas mais antigas, a sucessão de rochas sedimentares gondwânicas e os derrames de lavas básicas, intermediárias e ácidas da Serra Geral. Essa conformação geológica resulta da superposição de inúmeros eventos geotectônicos dos quais os mais antigos remontam ao Arqueano, presentes na porção leste dos três estados do Sul (Scheibe, 1986).

2.2 Metodologia

O trabalho de Bruschi (2022) aborda detalhadamente os procedimentos de álgebra computacional utilizados nesta pesquisa. Pode-se dizer, em síntese, que foi aplicada uma metodologia baseada em rede neural convolucional U-Net para mapear as cicatrizes de deslizamentos de terra na Região Sul do Brasil. A confirmação manual das cicatrizes ocorreu por meio da análise visual de imagens, por um Engenheiro Geotécnico, e mostrou-se ser uma etapa essencial para garantir a confiabilidade do banco de dados, uma vez que a metodologia computacional aplicada, apesar de eficiente, ainda apresenta muitos falsos-positivos.

Inicialmente, as cicatrizes de deslizamento foram geradas a partir dos *pixels* de contorno que delimitam o solo exposto visível decorrente de cada deslizamento. Essas delimitações geraram a camada de máscara de cada imagem, que favoreceram a visualização do solo exposto. Os arquivos com os pontos obtidos foram carregados no programa Google Earth Pro, onde esses pontos passaram por um processo de triagem visual, para realizar separação dos pontos mais prováveis de corresponder a uma cicatriz de deslizamento. Nesses pontos foi realizada uma análise histórica das imagens, com a intenção de encontrar o ponto temporal onde ocorreu a ruptura. Nos pontos em que não foi possível identificar o período temporal de ocorrência do movimento de massa aconteceu, eles foram classificados apenas como positivos ou não para deslizamento.

Por fim, esses pontos foram então submetidos a análise profissional Geotécnico para a confirmação final. A seleção das imagens considerou como critérios os seguintes procedimentos visuais: forma geométrica resultante do talude e de seu entorno ao longo do tempo; coloração e a tipologia resultante da vegetação; presença de falhas e estruturas geológicas, de suas continuidades, alinhamentos e desalinhamentos; geomorfologia característica do local; presença de superfícies de ruptura; deslocamentos e deformações; correspondência do tipo de movimentação ocorrida com o esperado para os solos existentes no local. Na Figura 1 pode-se observar alguns exemplos de análises visuais realizadas antes, à esquerda, e depois, à direita, dos movimentos de massa.

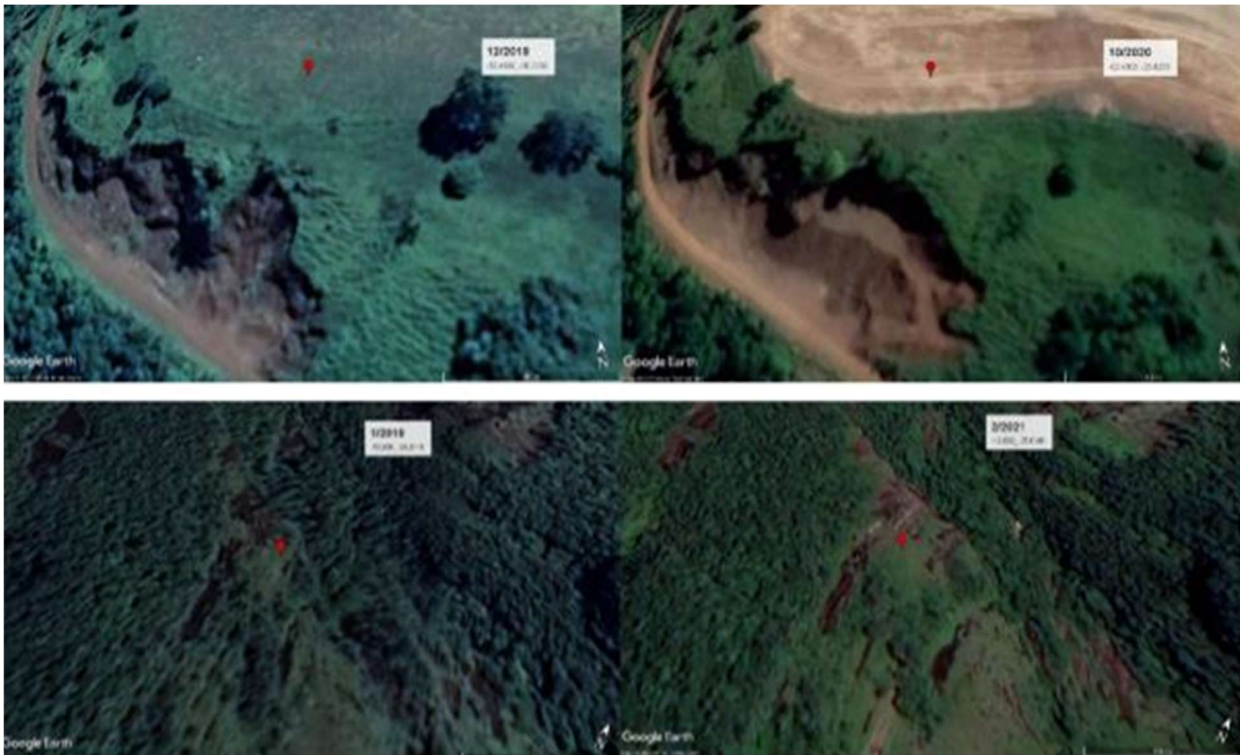


Figura 1. Exemplos de pontos com cicatrizes de movimentos de massa, antes e após o deslizamento.

Por outro lado, queimadas, desmatamentos, erosão, construções e solo cultivado ou sendo preparado para o cultivo são também interpretados como cicatrizes de deslizamento, dando origem a esses falsos-positivos, que podem ser observados na Figura 2.



Figura 2. Exemplos de falsos-positivos de cicatrizes de deslizamentos.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A aplicação da metodologia proposta por Bragagnolo et al. (2020) é um esforço inicial para que a detecção totalmente automática de cicatrizes de deslizamento seja um dia possível. Apesar de ainda não ser possível a detecção totalmente automática, o trabalho necessário para procurar visualmente por cicatrizes em imagens de uma área muito grande é muito maior do que realizar a análise dos pontos identificados por uma rede neural. Também é importante mencionar que a rede neural foi capaz de identificar cicatrizes de deslizamento que não haviam sido identificadas anteriormente no processo de criação das máscaras, ou que não estavam registradas em inventários de deslizamentos conhecidos, o que solidifica a importância da aplicação de aprendizado de máquina para a identificação de áreas que passaram previamente despercebidas.

Os pontos foram gerados para as 38 grades TM da América do Sul. Para cada grade analisada, são gerados em média cerca de 50.000 pontos de coordenadas. Esses pontos representam em sua maioria falsos-positivos, e a sua correta identificação muitas vezes depende da qualidade das imagens de satélite disponíveis para o local.

A grande quantidade de falsos-positivos obtida não é algo desanimador. É considerado menos problemático a identificação de uma cicatriz não existente do que a não identificação de uma cicatriz existente, uma vez que apesar de exigir esforço humano, os falsos-positivos podem ser removidos sem grandes dificuldades, mas as cicatrizes não identificadas oferecem um risco maior. Esses falsos-positivos também não são difíceis de serem entendidos. Todo fenômeno ou evento que faça com que o solo tome características semelhantes à de um deslizamento, pode causar um falso-positivo. Áreas de floresta queimada, terra plantada ou sendo preparada para o plantio, atividades de mineração, estradas, novas construções, telhados, florestas desmatadas, solos que sofreram erosão são falsos-positivos comuns de serem encontrados nos resultados de saída deste procedimento.

A primeira etapa de separação dos falsos-positivos dos verdadeiros-positivos, feita manualmente, serve para separar os mais grosseiros e que são fáceis de serem identificados, como as construções, atividades de mineração e zonas de plantio. A segunda etapa da separação, mais desafiadora, é a validação das cicatrizes já separadas na primeira etapa. Esses falsos-positivos analisados na segunda etapa são difíceis de serem diferenciados de uma cicatriz de deslizamento, por muitas vezes possuem forma, cor e aparência muito semelhantes à de um deslizamento real. Além disso, as imagens fornecidas pelo *Google Earth Pro* nem sempre são completamente claras e, frequentemente, acabam ficando distorcidas na visualização 3D, o que dificulta o processo. Por isso, para garantir a confiabilidade do banco de dados, na segunda etapa, os pontos também foram submetidos a análise de um especialista Geotécnico. É importante mencionar que mesmo com a análise de um especialista para treinamento da rede neural, é possível que alguns pontos tenham sido incorretamente identificados. Para essa segunda etapa, foram analisados cerca de 800 pontos com potencial de serem algum tipo de movimento de massa.

Além do banco de dados ser composto pelos pontos com as coordenadas das cicatrizes de deslizamento de alta confiabilidade, ele também contém informações referentes a data de ocorrência dos movimentos de massa, o que permite também investigar as suas possíveis causas. Entretanto, isso não é regra para todos os pontos presentes no banco de dados, pois muitas destas cicatrizes são antigas e não foi possível realizar a identificação da sua data de origem.

A metodologia aplicada foi capaz de identificar diversas cicatrizes de deslizamento localizadas fora das áreas dos municípios monitorados pelo CEMADEN (2022). Isso reforça a importância da realização de trabalhos como esse para a complementação dos bancos de dados existentes, principalmente em países em desenvolvimento, onde a falta de infraestrutura técnica faz com que nem a população, nem as entidades governamentais, tenham conhecimento suficiente a respeito da localização e da ocorrência de deslizamentos, dificultando assim a identificação e classificação de zonas de risco (Petschko et al., 2014).

O resultado desse trabalho foi a elaboração de um banco de dados com 307 pontos de deslizamento de terra de alta confiabilidade. Nas Figuras 3 e 4 estão representados os pontos de deslizamento identificados nesse trabalho, em mapas de declividade e elevação, respectivamente, para toda a Região Sul. Na Figura 5 é possível observar os pontos em relação aos municípios da Região Sul, com os municípios monitorados pelo CEMADEN (2022) destacados na cor rosa.

Espera-se que o banco de dados produzido seja utilizado para o desenvolvimento e a aprimoração de metodologias cada vez mais eficientes e eficazes na detecção de cicatrizes de deslizamento, além de poder ser

utilizado como base para a produção de mapas de susceptibilidade de risco de deslizamentos e sistemas de alertas e prevenção.

As técnicas de triagem das imagens usadas pelo especialista, para a identificação e separação de cicatrizes de deslizamentos de outras imagens, mostrou-se eficiente, refletindo em bons valores de precisão, até acima do esperado. O aprimoramento desta metodologia poderá tornar possível, não só a identificação, como também, a classificação automática, através da forma da cicatriz e do tipo de movimento de massa ocorrido. Da mesma forma, a consideração de variáveis relacionadas ao tempo e hidrológicas poderá proporcionar uma estimativa com boa precisão da data de ocorrência dos movimentos de massa.

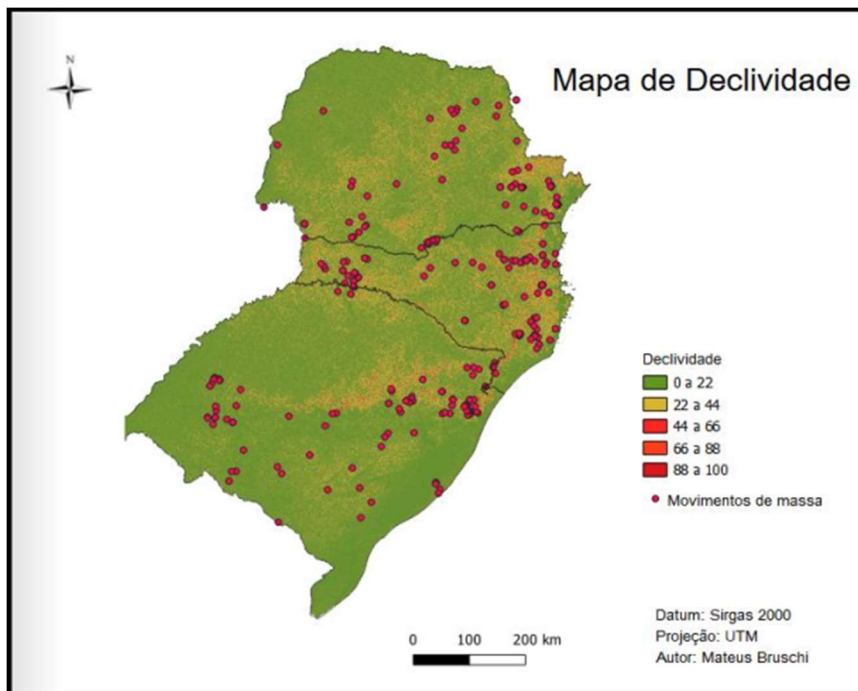


Figura 3. Mapa de declividade da Região Sul com os pontos de deslizamento identificados.

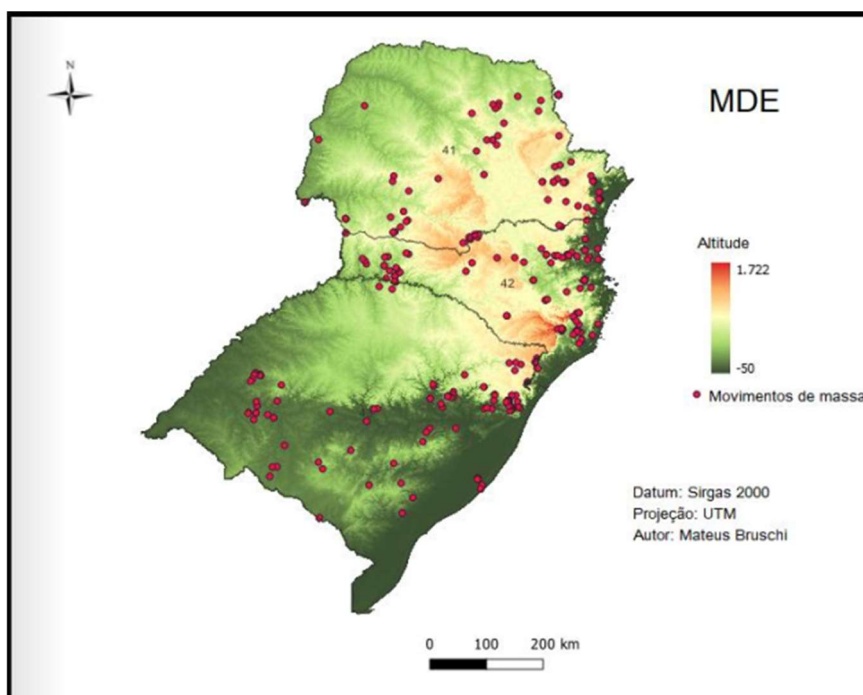


Figura 4. Mapa de elevação da Região Sul com os pontos de deslizamento identificados.

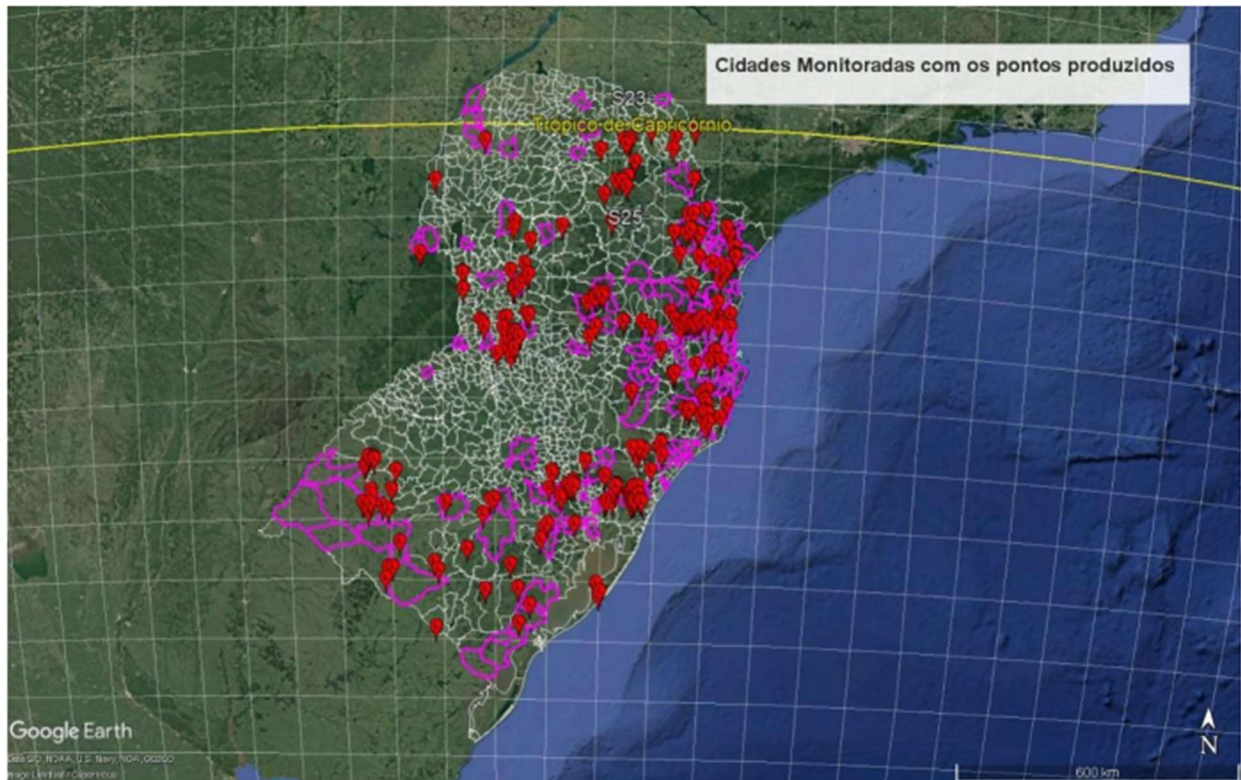


Figura 5. Municípios monitorados pelo CEMADEN (2022) (em rosa) com os pontos de deslizamento identificados (em vermelho).

Os resultados produzidos deixam evidente que a aplicação de métodos baseados em *deep learning*, para a segmentação de locais onde ocorreram deslizamentos de terra, tem grande potencial. Apesar disso, o caminho para um trabalho de segmentação automático ainda é longo e a verificação dos pontos por um profissional foi necessária para o método aplicado nesse trabalho.

5 CONCLUSÕES

A aplicação de metodologias de aprendizado de máquina vem demonstrando muito promissora no combate aos riscos e impactos dos desastres ambientais. Este estudo produziu, através de uma abordagem semiautomática, um banco de dados de alta confiabilidade de cicatrizes de deslizamentos. Esse inventário de deslizamentos além de conter as coordenadas geográficas, ele também contém informações relacionadas a data de ocorrência dos movimentos de massa. Essas informações podem ser valiosas para o desenvolvimento de novos sistemas de mapeamento de susceptibilidade e risco de deslizamentos de terra.

Os falsos-positivos são um problema existente, porém a metodologia empregada requer menos recursos e esforços humanos que a grande maioria das alternativas conhecidas. A validação deste inventário de deslizamentos de terra por um geotécnico, garante a esse inventário um grau de confiabilidade elevado. Análises realizadas por outros profissionais seriam um esforço interessante para melhorar ainda mais o banco de dados produzido nesse trabalho.

Outra possibilidade é o aprimoramento da metodologia, para que além de identificar a existência ou não de uma cicatriz de deslizamento, seja possível também classificar automaticamente, através da forma da cicatriz, o tipo de movimento de massa ocorrido. Além disso, com os intervalos de tempo em que os deslizamentos foram formados é possível obter os dados hidrológicos do local, para possivelmente estimar a data de ocorrência dos movimentos de massa.

Essa pesquisa é um esforço para o desenvolvimento de sistemas capazes de minimizar os riscos e as consequências de desastres naturais, como os deslizamentos de terra, para a sociedade. Especialmente para as regiões mais carentes de infraestrutura e de recursos, necessários para lidar adequadamente com esses desastres.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bragagnolo, L.; Silva, R. V; Grzybowski, J.M.V. (2019) Landslide susceptibility mapping with r. landslide: A free open-source Gis-integrated tool based on Artificial Networks. *Environmental Modelling & Software*, v. 123, p. 104565.
- Bruschi, M. (2022) *Deep learning aplicada a segmentação semântica semiautomática de cicatrizes de deslizamentos de terra*. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 34 f.
- Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN (2022). *Riscos geohidrológicos*. Disponível em: <<https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/riscos-geo-hidrologicos>>. Acesso em: 7 jun. 2022.
- Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN (2023). *Riscos geohidrológicos*. Disponível em: <<https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/riscos-geo-hidrologicos>>. Acesso em: 8 dez. 2023.
- Gameiro, S. (2020) *Capacidade de generalização e extrapolação espacial de redes neurais artificiais no mapeamento a suscetibilidade de deslizamentos*. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 99 f.
- Hervás, J.; Bobrowsky, P. (2009) Mapping: inventories, susceptibility, hazard and risk. *Landslides–disaster risk reduction*, Springer, p. 321-349.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2018). População em áreas de risco no Brasil. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/6d4743b1a7387a2f8ede699273970d77.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2022.
- Krøgli, I. K., Devoli, G., Colleuille, H., Boje, S., Sund, M., Engen, I. K. (2018) The Norwegian forecasting and warning service for rainfall - and snowmelt - induced landslides, *Natural hazards and earth system sciences*, v. 18, p. 1427-1450.
- Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J., Glade, T. (2014) Assessing the quality of landslide susceptibility maps – case study Lower Austria. *Natural hazards and earth system sciences*, v. 14, p. 95-118,
- Pourghasemi, H.R; Rahmati, O. (2018) Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena*, v. 162, p. 177-192.
- Prakash, N., Manconi, A., Loew, S. (2020) Mapping landslides on EO data: Performance of deep learning models vs. traditional machine learning models. *Remote Sensing*, v. 12, n. 346.
- Scheibe, L.F. (1986). A geologia de Santa Catarina: sinopse provisória. *Geosul*, vol. 1, n. 1, p.7-38.
- Soares, L. P. (2022) *Segmentação automática de cicatrizes de deslizamento de terra em imagens de sensores remotos utilizando aprendizagem profunda de máquina (Deep Learning)*. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 128 f.
- Stumpf, A.; Kerle, N. Object-oriented mapping of landslides using Random Forests. *Remote sensing of environment*, Elsevier, v. 115, n. 10, p. 2564-2577, 2011.
- Tavares, R. (2010). *Imbricações entre os ritmos do clima e os ritmos da urbanização na formação de risco e vulnerabilidade socioambientais a deslizamentos de terra na Serra do Mar-Ubatuba/SP*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 263 f.
- Vanacôr, R. N.; Rolim, S. B. A. Mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos usando técnicas de estatística bivariada e sistema de informações geográficas na região nordeste do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n. 1, 2012.
- Zhong, C., Liu, Y., Gao, P., Chen, W., Li, H., Hou, Y., Nuremanguli, T., Ma, H. Landslide mapping with remote sensing: challenges and opportunities. *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, v. 41, n. 4, p. 1555-1589, 2019.