



PREDIÇÃO DE DESLIZAMENTOS COM O MODELO SPRIN-SL NA BACIA DO RIO GIGANTE, SERRA DO MAR PARANAENSE.

Lucas Daniel Klein França ¹

Felipe Costa Abreu Lopes ²

Irani dos Santos ³

Karen Estefania Moura Bueno ⁴

RESUMO

Deslizamento pode ser definido como um movimento de descida de rocha, solo, ou ambos, em declive, a partir da ruptura de uma encosta. Devido à magnitude desse tipo de evento, há um grande dano potencial associado à sua ocorrência, que acarreta riscos socioeconômicos e a vida humana em sua área de abrangência. Dessa forma, a predição desses eventos é de grande relevância para o planejamento ambiental, garantindo segurança frente a desastres em potencial. Nas últimas décadas surgiram modelos computacionais de base física capazes de simular áreas de suscetibilidade a eventos de deslizamento, como o TRIGRS, SINMAP e SHALSTAB. Recentemente, Raimondi et. al. (2022) elaboraram o modelo Spatial Prediction of Rainfall-Induced Shallow Landslides (SPRIn-SL). O SPRIn-SL é uma ferramenta computacional desenvolvida para avaliar a suscetibilidade a deslizamentos rasos, de modo a integrar dados geotécnicos e hidrológicos à topografia para essa análise. O modelo SPRIn-SL traz algumas diferenças em seus procedimentos metodológicos, se comparado aos modelos mais tradicionais de avaliação de suscetibilidade a deslizamentos, como ferramentas de pré-processamento de consistência hidrológica do terreno e uma metodologia baseada em regressão polinomial para estimativa da espessura do solo de forma distribuída. O presente artigo buscou avaliar o desempenho do modelo SPRIn-SL a partir de um inventário de cicatrizes de deslizamentos na bacia do Rio Gigante, afluente do Rio Jacaré, na Serra do Mar Paranaense, em março de 2011. Como resultado, observou-se uma superestimativa das áreas com suscetibilidade a deslizamentos (fator de segurança <1) em relação ao evento observado, com pequenas áreas de falsos alarmes e diferença nas formas das áreas instáveis. Nota-se que o padrão espacial da simulação reflete a influência da declividade do terreno e da espessura do solo. O SPRIn-SL também apresentou elevada sensibilidade aos valores de condutividade hidráulica saturada.

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná - UFPR, l.kfranca@outlook.com;

² Doutor em Geografia e Professor do Instituto Federal de São Paulo – IFSP, fcalopes@ifsp.edu.br;

³ Doutor em Geografia e Docente do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná – UFPR, irani@ufpr.br;

⁴ Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná- UFPR, karenmbueno@gmail.com



INTRODUÇÃO

Os deslizamentos de terra constituem um dos eventos naturais mais recorrentes e de maior impacto em regiões úmidas e de declividade acentuada, como a Serra do Mar brasileira. Esses eventos são caracterizados pela movimentação descendente de solo, rocha ou ambos, a partir da ruptura de uma superfície previamente contínua de uma encosta (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008). Sua ocorrência, quando em áreas ocupadas, está associada a elevados danos materiais, riscos à infraestrutura e, mais gravemente, à perda de vidas humanas. Dada sua magnitude e potencial destrutivo, os deslizamentos representam um desafio constante para o planejamento urbano e ambiental.

Nesse contexto, a predição e o mapeamento dessas áreas suscetíveis a deslizamentos têm se tornado uma frente essencial de mitigação desses danos em potencial. Nas últimas décadas, o avanço das geotecnologias e da modelagem computacional permitiu o desenvolvimento de ferramentas georreferenciadas capazes de simular os processos físicos envolvidos na instabilidade de encostas. Modelos como o TRIGRS (BAUM et al., 2008), SHALSTAB (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994) e SINMAP (PACK et al., 1998) têm sido amplamente utilizados e representados na literatura científica para esse fim, combinando propriedades geotécnicas do solo, informações topográficas e, por vezes, dados de precipitação, para estimar áreas com maior probabilidade de rompimento de encostas.

Mais recentemente, Raimondi et al. (2022) propuseram um novo modelo denominado *Spatial Prediction of Rainfall-Induced Shallow Landslides* (SPRIn-SL), desenvolvido com o objetivo de oferecer uma abordagem mais integrada para a predição de deslizamentos rasos. O SPRIn-SL é baseado no modelo conceitual de vertente infinita, e incorpora dois componentes hidrológicos relevantes: o modelo TOPOG (O'LOUGHLIN, 1986), responsável por simular a saturação do solo em função do escoamento subterrâneo, e o modelo de infiltração de Green-Ampt (1911), que representa a infiltração transiente da água no solo.

Integrado ao Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto QuantumGIS (QGIS), o modelo inova ao incluir ferramentas auxiliares como rotinas de pré-processamento hidrológico do terreno, bem como um método de regressão polinomial



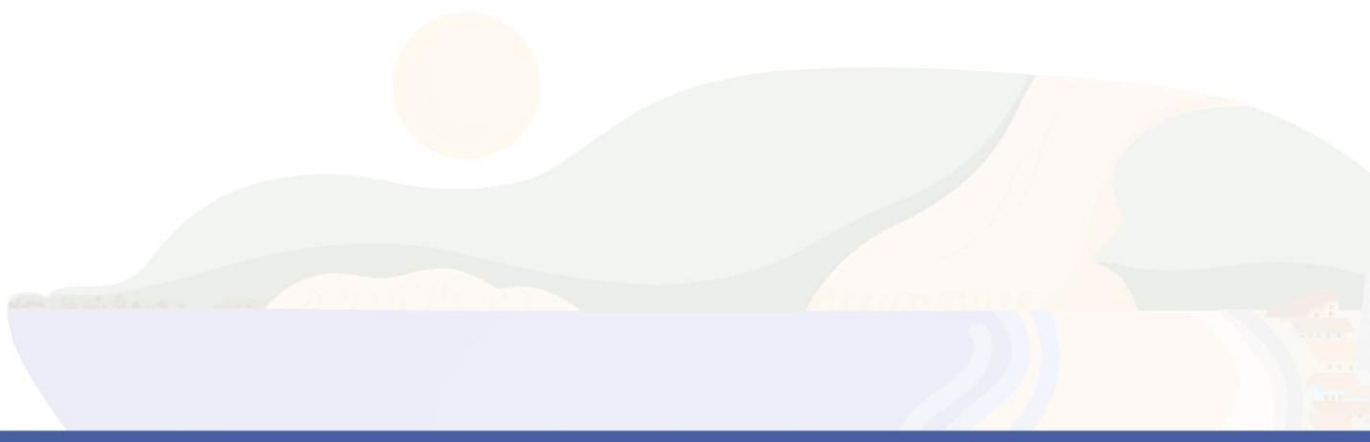
para estimar, de forma distribuída, a espessura do solo, baseado em variáveis morfométricas.

O presente trabalho buscou avaliar o desempenho do modelo SPRIn-SL na bacia do Rio Gigante, afluente do Rio Jacareí, localizada na porção paranaense da Serra do Mar. A área de estudos é caracterizada por um relevo fortemente dissecado, alta declividade e histórico de ocorrência de deslizamentos rasos, especialmente durante episódios de chuvas intensas ou de grande duração, como no evento de março de 2011, onde estações próximas registraram uma precipitação de até 406,40 mm em um intervalo total de 143 horas, quase o dobro esperado para o mês de março (DE ANGELO, 2022).

A análise foi realizada a partir da comparação entre os resultados da simulação (baseados no cálculo do fator de segurança distribuído) e um inventário de cicatrizes de escorregamentos mapeados após o evento decorrido da pluviosidade supracitada, utilizando para isso a metodologia incorporada ao próprio modelo.

METODOLOGIA

Para a representação do relevo da bacia do Rio Gigante, afluente do Rio Jacareí, foi elaborado um Modelo Digital de Terreno (MDT) por meio da ferramenta “Interpolação TIN”, do *software* QGIS, o qual foi utilizado como um dado de entrada para o processo de modelagem com o SPRIn-SL. O modelo foi elaborado com base em curvas de nível em escala 1:25.000, tendo sido interpolado para obter uma resolução de 5 metros. O MDT resultante desse processo, bem como a área de estudo do presente trabalho, podem ser visualizados na Figura 1.



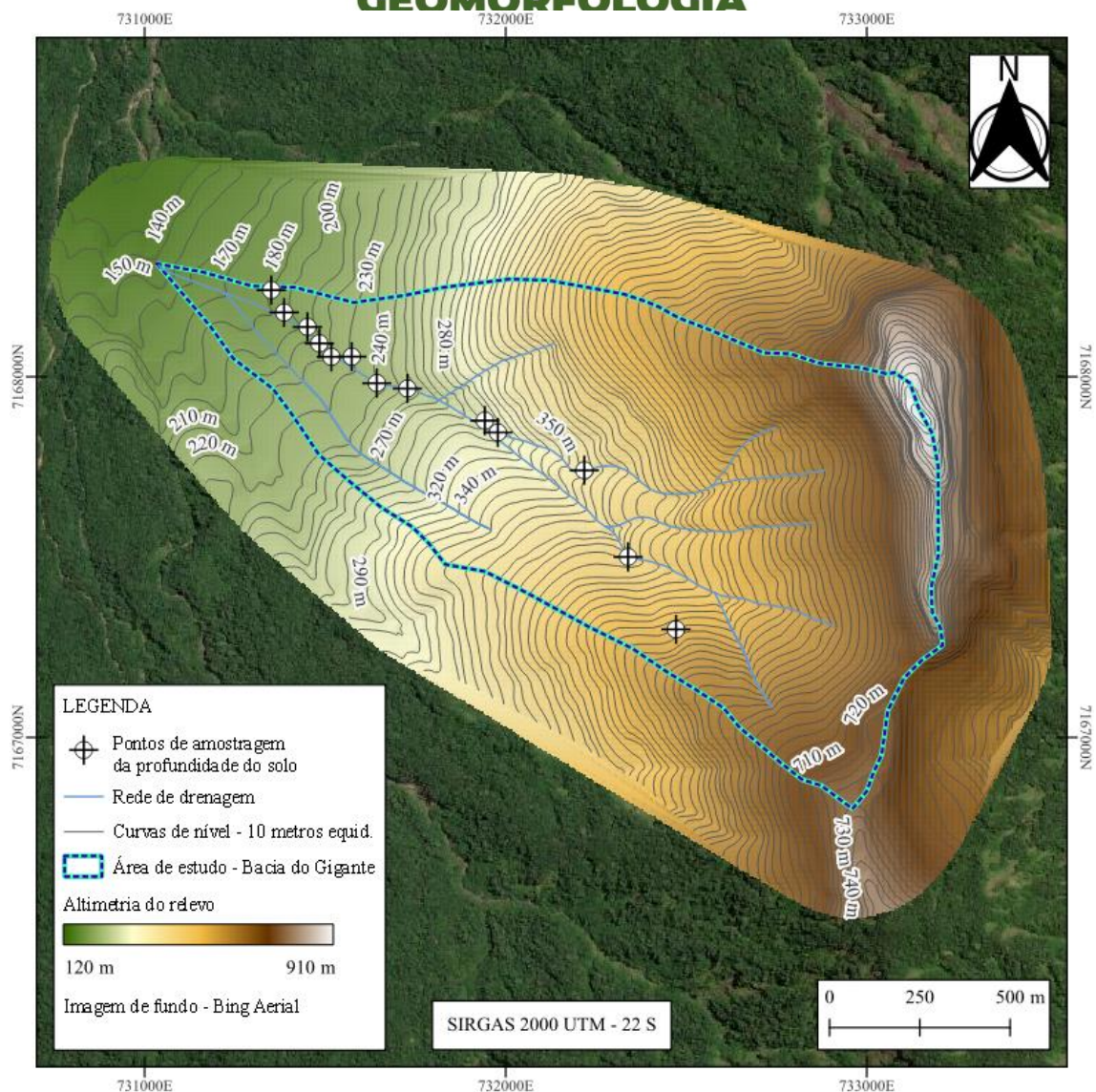


Figura 1 - Área de estudo e hipsometria (Fonte: Os autores)

O SPRIn-SL utiliza de sua primeira etapa para a realização da consistência hidrológica da superfície, como o emprego da normalização pela metodologia do vizinho mais próximo para correção de discontinuidades no *raster*. Posteriormente, é possível recortar a superfície *raster* em função da bacia hidrográfica estudada, e então, o modelo utiliza dessa nova superfície hidrologicamente consistida para a extração das variáveis morfométricas de cada pixel a serem utilizadas nas etapas seguintes, sendo essas a declividade, a área de contribuição a montante e o índice topográfico de posicionamento (TPI).

Com os resultados morfométricos, bem como com uma camada vetorial georreferenciada dos pontos amostrados da espessura do solo, o modelo então é capaz de



realizar uma regressão polinomial de até terceiro grau, para a geração de um valor de espessura de solo espacialmente distribuído para toda a área de estudos. Destaca-se que o modelo de estimativa da espessura solo está condicionado à quantidade e à representatividade espacial dos pontos amostrados. Como na área de estudos os pontos medidos de espessura do solo estão concentrados em uma determinada faixa de altitude, foi necessário limitar a espessura máxima simulada do solo acima dessa faixa aos valores efetivamente observados na bacia, sendo adotada uma espessura máxima de 6 metros.

Posteriormente, o SPRIn-SL utiliza das variáveis morfométricas obtidas, do mapa de espessura do solo, do evento de chuva a ser simulado e de parâmetros que expressam as propriedades físico-hídricas do solo para calcular o índice de umidade total, baseado no índice de umidade em estado estacionário do modelo hidrológico TOPOG (O'LOUGHLIN, 1986) e no índice de umidade transiente (GREEN e AMPT, 1911). Para esse cálculo, o SPRIn-SL requer dados de condutividade hidráulica saturada (mm/h), infiltração efetiva (mm/mês), déficit de umidade do solo (adimensional, variando de 0-1) e do potencial mátrico do solo (mm).

Para o valor de condutividade hidráulica saturada recorreu-se a literatura técnica, testando no modelo valores obtidos para relevos e tipos de solo similares ao encontrado na área de estudo, ou seja, regiões montanhosas onde a pedologia é predominantemente composta por cambissolos háplicos e neossolos litólicos (DA SILVEIRA et. al., 2012), que variavam de 3 a 36 mm/h (LISTO et. al., 2018). Contudo, avaliou-se que essa variável é de grande sensibilidade no modelo, e a representação desta por dados secundários se mostrou insatisfatória. Nesse sentido, alguns trabalhos demonstram que a condutividade real de uma encosta é bastante superior aos valores medidos diretamente em campo, devido ao efeito de escala de mapeamento e a existência de caminho preferenciais subsuperficiais não representados nas análises pontuais (SANTOS, 2009). Assim, optou-se pela calibração da condutividade hidráulica saturada, testando valores para obtenção de resultados que apresentassem concordância com o inventário de cicatrizes levantado *in situ*.

Após a obtenção do índice de umidade total, realiza-se o cálculo do fator de segurança, onde o modelo utiliza, para além do índice calculado na etapa anterior, o MDT, a espessura do solo (m), a declividade (graus), bem como valores de coesão total do solo (kPa), o peso do solo saturado (kN/m³) e o ângulo de atrito do solo (graus). O resultado desse processamento é o fator de segurança, um índice adimensional que descreve a



condição da área analisada, onde valores de 0 a 1 denotam as áreas de instabilidade suscetíveis a escorregamentos, 1 sendo o valor do limite da estabilidade, e acima de 1, áreas de baixo potencial de deslizamentos.

Os valores dos parâmetros empregados ao longo de todas as etapas da modelagem descritas até o presente momento constam da Tabela 1.

Tabela 1 - Valores empregados para cada parâmetro do modelo

Parâmetro do modelo	Valor utilizado	Fonte do valor utilizado
Intensidade da Chuva (mm)	9,6	Da Silveira et. al. (2012)
Duração da chuva (h)	24	Da Silveira et. al. (2012)
Condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h)	110	Calibrada, tendo como base o inventário de cicatrizes
Infiltração efetiva (mm/mês)	184	Chuva média para o mês do fenômeno, calculada com base na série histórica da estação pluviométrica 2548093 (IAT), menos o coeficiente de escoamento superficial de 0,20 para o tipo de cobertura vegetal (Colischonn e Dornelles, 2021)
Déficit de umidade do solo inicial (adimensional, 0-1)	0,192	Colischonn e Dornelles, 2021
Potencial mátrico do solo (mm)	316,3	Colischonn e Dornelles, 2021
Coesão total do solo (kpa)	17	Folador (2015)
Peso do solo saturado (kN/m ³)	16,96	Adaptado de Kozciak (2005)
Ângulo de atrito do solo (°)	23,5°	Folador (2015)

A avaliação da simulação foi realizada em comparação com o inventário de cicatrizes de deslizamentos conforme proposto por Erbert et. al. (2007), que se baseia, em primeiro lugar, na construção de 3 tipos de resultados para as células da superfície representadas pelo SPRIn-SL. Essas células podem ser compreendidas como um acerto do modelo (H), quando a célula foi corretamente prevista como instável, uma falha (M) quando a área instável é indicada pelo inventário de cicatrizes, mas não foi identificada pelo modelo, e como alarme falso (F), quando a área estável, conforme inventário, é erroneamente indicada como instável. Com base nessa tipologia, no inventário de cicatrizes, e em um valor de equidistância e quantidade de *buffers* para a análise espacial, resulta na elaboração de 4 índices, sendo esses o Índice de Detecção (POD), o Índice de Falsos Alarmes (FAR), o Índice de Predição Correta (TPR) e o Índice Crítico de Sucesso (CSI). A tabela 2 apresenta como esses índices são calculados.

Tabela 2 - Índices para avaliação dos resultados do SPRIn-SL (Fonte: os autores com base em Raimondi et al., 2022)

Índice	Símbolo	Fórmula	Descrição
Índice de Detecção (Probability of Detection)	POD	$H / (H + M)$	Proporção dos deslizamentos observados que foram corretamente detectados.
Índice de Falsos Alarmes (False Alarm Ratio)	FAR	$F / (H + F)$	Proporção de falsos alarmes entre todas as previsões de instabilidade.
Índice de Predição Correta (True Prediction Ratio)	TPR	$H / (H + F)$	Proporção de acertos entre todas as previsões de instabilidade.
Índice Crítico de Sucesso (Critical Success Index)	CSI	$H / (H + F + M)$	Mede a precisão geral considerando acertos, falsos alarmes e falhas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 mostra os valores encontrados para os quatro índices de desempenho do modelo, apresentados de acordo com cada equidistância de *buffer* utilizada para sua extração, em relação ao inventário de cicatrizes.

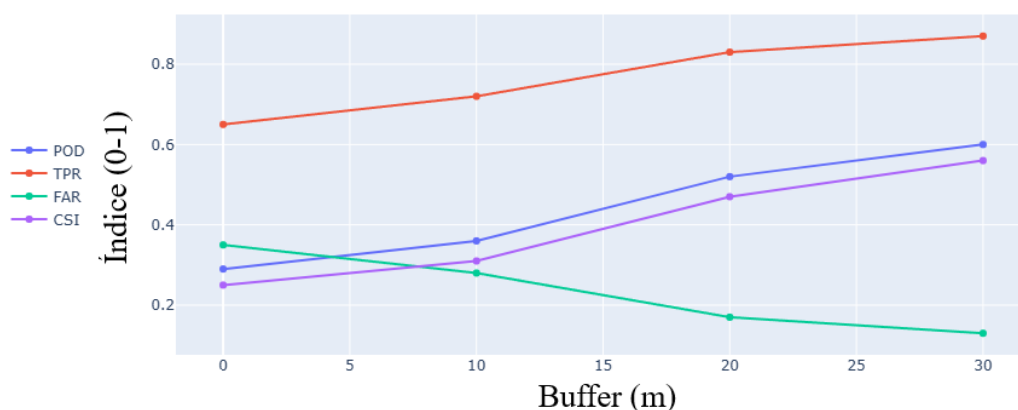


Figura 2 - Resultado dos índices de desempenho do SPRIn-SL para a área de estudos (Fonte: os autores)

O índice de predição correta (TPR) variou de 0,65 a 0,87. Para esse indicador, valores próximos de 0 do índice TPR indicam uma baixa performance, enquanto iguais a 1 indicam perfeita concordância entre inventário e o resultado da simulação. Isso vale também para o índice de detecção (POD) e para o índice crítico de sucesso (CSI), que variaram de 0,29 a 0,60 e de 0,25 a 0,56, respectivamente. Para a finalidade de medir o desempenho do modelo, destaca-se que o CSI o índice de maior relevância, uma vez que é capaz de avaliar todas as combinações de erros e acertos das células. O índice de falsos alarmes (FAR), o único inversamente proporcional, variou de 0,35 a 0,13, conforme o incremento de equidistância do buffer utilizado.

A figura 3 ilustra as áreas instáveis em relação ao inventário de cicatrizes e os *buffers* utilizados na determinação dos índices de desempenho da modelagem.

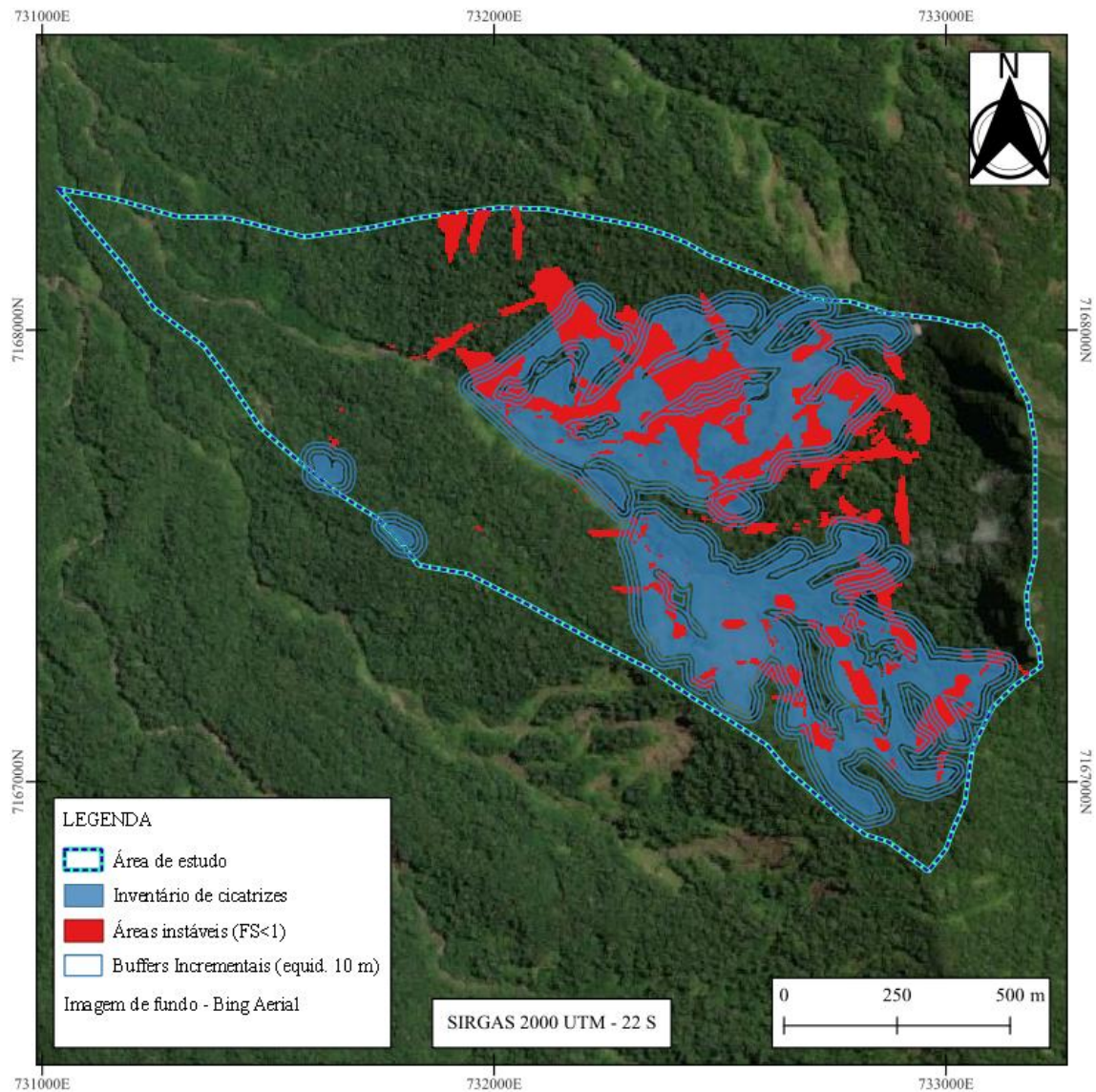


Figura 3 - Resultados do modelo SPRIn-SL para a área de estudos (Fonte: os autores)

Nota-se uma concordância espacial em termos gerais para as áreas de ocorrência de cicatrizes e as células do modelo identificadas como instáveis. Todavia, alguns falsos positivos se concentram em pontos específicos da bacia, enquanto a forma resultante das áreas identificadas como instáveis tem baixa semelhança com a geometria das cicatrizes inventariadas.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

De maneira geral, a simulação realizada com o modelo SPRIn-SL apresentou concordância de áreas instáveis com as cicatrizes, com o índice de predição correta (TPR) apresentando bom desempenho do modelo, principalmente consideram-se as faixas de incerteza (*buffers*) no entorno das cicatrizes de deslizamento. Em contrapartida, foram identificadas limitações, pois o desempenho do modelo na simulação realizada reduz significativamente quando se considera o índice crítico de sucesso (CSI), o qual mede a precisão geral considerando acertos, falsos alarmes e falhas na previsão.

Contudo, o potencial de assertividade do modelo pode ter sido influenciado por alguns fatores limitantes. Em primeiro, destaca-se que a condição de recorrer a dados da literatura científica para os valores paramétricos resultou em valores únicos para parâmetros que poderiam ser espacialmente distribuídos, potencialmente reduzindo sua representatividade. Para além disso, identifica-se que uma das facilidades de aplicação desse modelo é a estimativa da espessura do solo pela regressão polinomial com base nas amostragens pontuais existentes. No entanto, o resultado dessa estimativa depende da representatividade dessa amostragem em relação à heterogeneidade espacial existentes na área de estudo, sendo que no presente trabalho foi necessário incluir um limiar para os valores de espessura máxima do solo visando contornar essa limitação amostral.

Ressalta-se, que na aplicação apresentada o modelo foi testado em condições adversas com relação a disponibilidade de dados de entrada, notadamente aqueles relacionados com a heterogeneidade espacial da espessura e propriedades físico-hídricas do solo. Porém, essa escassez de informações condiz com a realidade de praticamente todas as regiões sujeitas a deslizamentos de encosta, sendo necessário avaliar a sensibilidade das previsões frente a essas importantes limitações.

Considerando se tratar de um modelo de base física, de caráter determinístico, avalia-se que a sua aplicação para futuras análises pode apresentar maior assertividade ao maximizar a representatividade de cada parâmetro empregado, se possível, variando-os espacialmente. Dessa forma, recomenda-se a avaliação do modelo em outros contextos, com distintas realidades ambientais e de disponibilidade de informações.

Palavras-chave: Deslizamentos, modelagem, SPRIn-SL, Serra do Mar Paranaense.

REFERÊNCIAS

- BAUM, Rex L.; SAVAGE, William Z.; GODT, Jonathan W. **TRIGRS: a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis**, version 2.0. Reston, VA, USA: US Geological Survey, 2008.
- COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2. ed. rev. ampl. Porto Alegre: Associação Brasileira dos Recursos Hídricos, 2015.
- DA SILVEIRA, Claudinei Taborda et al. **Análise do fator de segurança da estabilidade das vertentes na bacia do Rio Jacaré, Serra do Mar Paranaense**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 13, n. 3, 2012.
- DE ANGELO, Ana Carolina Sanches; FONTÃO, Pedro Augusto Breda; DOS SANTOS, Irani. **Águas de março: origem e excepcionalidade de evento extremo de precipitação ocorrido na Serra do Mar paranaense**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 31, p. 332-361, 2022.
- EBERT, Elizabeth E.; JANOWIAK, John E.; KIDD, Chris. **Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 88, n. 1, p. 47-64, 2007.
- FOLADOR, Rodrigo Marques; SILVEIRA, CLAUDINEI TABORDA; FIORI, A. P. **Cálculo da Probabilidade e Quantificação do Volume de Material Suscetível a Escorregamentos-Bacia do Rio Jacaré, Morretes - PR**. Boletim Paranaense de Geociências, [S./l.], v. 74, n. 1, p. 47-56, 2018.
- GREEN, H.; AMPT, G. A. **Studies on soil physics**. The Journal of Agricultural Science, Cambridge, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.
- GOVERNO DO PARANÁ. Instituto Água e Terra. **Série histórica de dados pluviométricos da estação 2548093**. Curitiba.
- HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. **O manual de deslizamento – Um guia para a compreensão de deslizamentos**. Reston, Virginia, US Geological Survey Circular, 2008
- SANTOS, Irani dos. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: Mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**. 2009.
- KOZCIAK, S. **Análise determinística da estabilidade de vertentes na bacia do rio Marumbi – Serra do Mar – Paraná**. Curitiba, 2005.
- LISTO, Fabrizio de Luiz Rosito; GOMES, Maria Carolina Villaça; VIEIRA, Bianca Carvalho. **Avaliação da variação do fator de segurança com o modelo TRIGRS**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 19, n. 1, 2018.
- MONTGOMERY, D. R., DIETRICH, W.E. **A physically based model for the topographic control on shallow landsliding**. Water Resources Research, 30, p. 1153-1171. 1994.
- O'LOUGHLIN, E. M. **Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis**. Water resources research, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.
- PACK, Robert T.; TARBOTON, David G.; GOODWIN, Craig N. **The SINMAP approach to terrain stability mapping**. 1998.
- RAIMONDI, Luca et al. **An open-source and QGIS-integrated physically based model for Spatial Prediction of Rainfall-Induced Shallow Landslides (SPRIn-SL)**. Environmental Modelling & Software, v. 160, 2023.