

Parâmetros geotécnicos e de mapas de suscetibilidade da Bacia do Córrego do Rio do Príncipe (Teresópolis/RJ), utilizando o software SHALSTAB

João Vitor de Paiva Esteves

Estudante, UFRJ, Petrópolis, Brasil, joao_vitorpe@poli.ufrj.br

Leonardo De Bona Becker

Professor, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, leonardobecker@poli.ufrj.br

Felipe Gobbi

Gerente técnico, Geobrugg AG, Porto Alegre, Brasil, felipe.gobbi@geobrugg.com

RESUMO: Em 2011, a região serrana do estado do Rio de Janeiro foi atingida por diversos movimentos de massa, incluindo fluxos de detritos, resultado de chuvas muito intensas. A maioria dos movimentos começou como escorregamentos translacionais rasos. Com o intuito de melhorar a compreensão desses fenômenos foram realizados ensaios de laboratório em amostras de solo indeformadas e deformadas obtidas na Bacia do Córrego do Príncipe (Teresópolis/RJ) para obtenção de parâmetros de resistência dos domínios geotécnicos identificados. De posse dos parâmetros de resistência, com o auxílio do software SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Model*), foi realizada uma análise de suscetibilidade a movimento translacionais, tendo como resultado a pluviosidade necessária para deflagrar o movimento de massa. Especificamente, este trabalho dedica-se a identificação e ao mapeamento das áreas de maior suscetibilidade, traçando uma caracterização da Bacia do Córrego do Príncipe, com o emprego da tecnologia GIS (*Geographic Information System*). A metodologia englobou em estudos de campo, delimitando os pontos de ensaio e coleta das amostras, uso de modelos cartográficos, ensaios de cisalhamento direto, caracterização e permeabilidade. Neste trabalho, os resultados da análise são comparados com as cicatrizes dos movimentos mapeados em 2011, que permitiram identificar que vários pontos da bacia eram suscetíveis a escorregamentos translacionais em condições de chuva semelhantes ao período de referência.

PALAVRAS-CHAVE: SHALSTAB, Suscetibilidade, Fluxo de detritos, Parâmetros de resistência, Teresópolis.

ABSTRACT: In 2011, the mountainous region of the state of Rio de Janeiro was hit by several mass movements, including debris flows, as a result of very intense rains. Most movements started as translational shallow slides. In order to improve the understanding of these phenomena, laboratory tests were carried out on undisturbed and disturbed soil samples obtained from the Córrego do Príncipe Basin (Teresópolis/RJ) to obtain shear strength parameters of the identified geotechnical domains. The software SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Model*) was used, to conduct an analysis of susceptibility to translational movements, resulting in the rainfall necessary to trigger the mass movements, based on the strength parameters. Specifically, this work is dedicated to identifying and mapping the areas of greatest susceptibility in, the Córrego do Príncipe Basin, using GIS (*Geographic Information System*) technology. The methodology included field studies to identify, sampling points, use of cartographic models, direct shear tests, physical characterization of soil and permeability tests. The results of the analysis are compared to known failure scars of the 2011 movements, which made it possible to identify that many points in the basin were susceptible to translational landslides under rainfall conditions similar to the reference period.

KEYWORDS: SHALSTAB. Susceptibility. Debris flow. Strength parameters. Teresópolis.

1 INTRODUÇÃO

Devido às suas características tropicais e geográficas, o Brasil é um país marcado por sua suscetibilidade a movimentos de massa, de diferentes mecanismos e tipologias (CEMADEN). O Anuário Brasileiro de Desastres Naturais apresentou para o ano de 2011, no Brasil, o registro oficial de 795 desastres naturais, que causaram 1094 óbitos sendo 43,14% decorrentes de deslizamentos. Afetando 2370 municípios, sendo 569 destes localizados na região sudeste do país (CENAD *et al.*, 2012).

No mesmo ano de 2011, o município de Teresópolis, RJ, foi atingido por centenas de movimentos de massa (AVELAR *et al.*, 2013). Na ocasião, a combinação da geografia local de Teresópolis, composta de relevo acidentado e com fortes declividades, associada a um evento pluviométrico extremo foi determinante para os movimentos.

Neste evento, o movimento de massa predominante foi o deslizamento translacional, caracterizado por rupturas planares, consequência do aumento da umidade do solo devido à alta intensidade pluviométrica em um curto intervalo de tempo ou da elevação do lenço freático.

Baseando-se na análise da região de Teresópolis afetada em 2011, conforme expressa a Figura 1, o intuito primário deste estudo é comparar escorregamentos translacionais registrados na bacia do córrego do Príncipe com previsões realizadas pelas análises utilizando o software SHALSTAB.

Como havia a necessidade de se trabalhar com dados não pontuais, visto que a área de estudo é uma bacia na qual foram mapeados mais de uma centena de movimentos, e os movimentos de massa desta bacia foram fundamentalmente translacionais, a opção selecionada foi o *software* SHALSTAB, que em sua tradução significa Modelo de Estabilidade de Deslizamentos Rasos (*Shallow Landslide Stability Model*) que foi desenvolvido por Dietrich & Montgomery (1994). Este programa se baseia na combinação do modelo de estabilidade tipo talude infinito e um modelo hidrológico, voltado para deslizamentos rasos, assumindo que, dentro do solo, ocorre fluxo paralelo ao terreno. Sendo assim, o modelo busca apontar as áreas suscetíveis a escorregamentos com base na relação entre a quantidade de chuva e transmissividade necessária pra deflagrar o movimento de massa.

A aplicação do modelo demanda o conhecimento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e permeabilidade dos solos envolvidos. Para isso, foram coletadas amostras indeformadas para realização de ensaios de cisalhamento direto. Além disso, foram realizados ensaios de caracterização física e de permeabilidade com carga variável na célula edométrica.

Este artigo apresenta a área de estudo, metodologia empregada e os resultados obtidos na compração do mapa de suscetibilidade proposto com os escorregamentos ocorridos no ano de 2011.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo se encontra no município Teresópolis, cujo relevo é notavelmente acidentado e se caracteriza pela presença da Serra dos Órgãos, uma cadeia de montanhas que faz parte do complexo orográfico da Serra do Mar. Este relevo é definido por elevações significativas e vales profundos, com altitudes que variam drasticamente ao longo do município.

A região de estudo é a Bacia do Córrego do Príncipe, na localidade da Posse, município de Teresópolis, região serrana do Rio de Janeiro, que possui uma área 12,6 km², altitude máxima de mais de 1550 metros e extensão de aproximadamente 4,5 km. Na bacia ocorrem três litologias predominantes: granitóide, granito e gnaisse, essas podem ser visualizadas na Figura 3.

A bacia é predominantemente coberta por solos residuais maduros (SRM) derivados de diferentes litologias. A litologia foi obtida pela análise do mapa Geodiversidade da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Em janeiro de 2011, a região serrana foi atingida por elevadas precipitações que resultaram em diversos deslizamentos e fatalidades. O evento foi deflagrado pelas condições climáticas extremas de precipitações acumuladas de 241,8 mm em 24 horas, com pico de 61,8 mm em uma hora, o que ocasionou a precipitação acumulada entre os dias 1º e 12 de janeiro de 573, 6mm (DOURADO, 2012).

Na ocasião, foram registrados 118 pontos de ruptura dentro da Bacia, algumas dos quais que resultaram num fluxo de detritos que formou uma área de deposição de 0,2 km², conforme expressa a Figura 1.

3 METODOLOGIA

Para a elaboração deste trabalho foram definidos os procedimentos expressos na Figura 2.

3.1 Levantamento e Mapeamento

O mapeamento das cicatrizes foi realizado, por meio de imagens de satélite com Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Para o modelo digital de elevação foram utilizados os dados do satélite ALOS PALSAR que operou de 2006 a 2011, fornecendo dados de elevação em resolução de 12,5 x 12,5 m adquiridas no portal Instalação de Satélite do Alasca (*Alaska Satellite Facility*) para o município de Teresópolis, RJ. Estas bases apresentam como referência geodésica o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000).

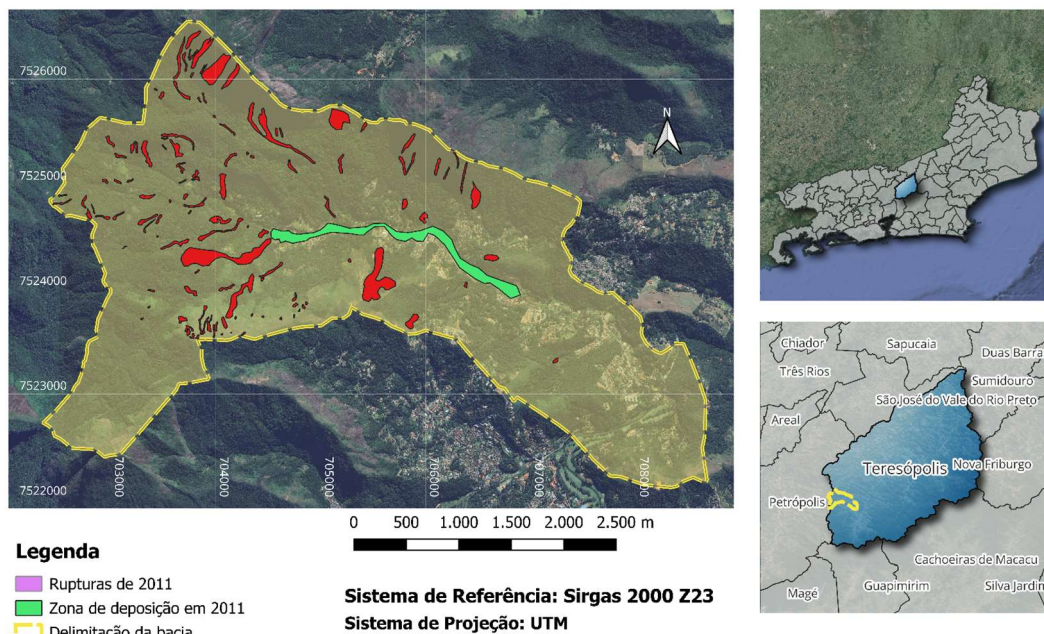


Figura 1 – Localização da Bacia do Córrego do Príncipe e rupturas em 2011. Adaptado de Google Earth (2024).

3.2 Retirada de amostras e Ensaios

A definição dos pontos de coleta para a realização dos ensaios foi baseada na litologia e nas cicatrizes do movimento de 2011. Após as locações preliminares, foi realizada uma inspeção de campo para reconhecimento, demarcação dos pontos acessíveis para coleta de amostras de solos residuais, reconhecimento dos aspectos geológicos e condições atuais da localidade.

Determinados os pontos de amostragem, foi realizada outra visita ao campo de estudo para a retirada de amostras. As amostras indeformadas foram obtidas cravando-se cilindros metálicos com 10 cm de altura e diâmetros de 10 cm a 15cm. Cada cilindro permitia a obtenção de dois corpos de prova. Antes da retirada de cada amostra, foi realizado um corte no talude visando eliminar a camada de solo mais superficial e permitir a inserção do cilindro metálico. As amostras foram retiradas em direção normal ao plano dos taludes, para que os planos de ruptura nos ensaios de cisalhamento direto fossem paralelos ao nível do terreno.

As amostras indeformadas foram arrasadas no topo e na base e envolvidas com papel filme, papel alumínio e transportadas em caixas de isopor com enchimento de serragem para evitar deformações e variações de umidade. As amostras deformadas foram acondicionadas em sacos plásticos com a devida identificação.

Os ensaios realizados foram os de cisalhamento direto, caracterização física e permeabilidade com carga variável. Para esses, foram realizados ensaios em solos residuais maduros e jovens, nas condições submersa e umidade natural. A Figura 3 ilustra a litologia da localidade de estudo e os pontos de coleta das amostras para a realização dos ensaios.

Para exemplificar os ensaios de cisalhamento direto, a Figura 4 e a Figura 5 ilustram resultados de alguns ensaios realizados e a Tabela 1 resume os resultados para os solos ensaiados.

A Tabela 1 exibe os valores de tensões utilizados nos ensaios e os índices de vazios inicial (e_0) e após o ensaio (e_f). Foram realizados 32 ensaios de cisalhamento direto para as três litologias apresentadas, incluindo Solos Residuais Maduros e Jovens (SRM e SRJ, respectivamente). O resumo das envoltórias de todos os solos e as devidas condições de ensaio são apresentadas na Tabela 2.

Para a determinação dos coeficientes de permeabilidade, foram realizados ensaios de carga variável na célula edométrica para as mesmas tensões utilizadas no ensaio de cisalhamento direto. Os resultados dos coeficientes de permeabilidade podem ser verificados na Tabela 2.

De posse dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, do modelo digital de elevação e da delimitação da litologia, foi realizada uma análise para aplicar os dados obtidos no programa de análise. Sendo assim, para cada tipo de rocha mãe, foram aplicados parâmetros de coesão, ângulo de atrito e espessura de solo. Para a espessura de solo, foram adotados valores limites de 0 e 4m, com base em experiência e inspeções de campo. Estes valores foram distribuídos proporcionalmente à declividade angular da bacia, conforme critério proposto por Azevedo *et al.* (2015). Desta forma, nos locais de maior declividade ocorrem as menores espessuras de solo, e vice-versa.

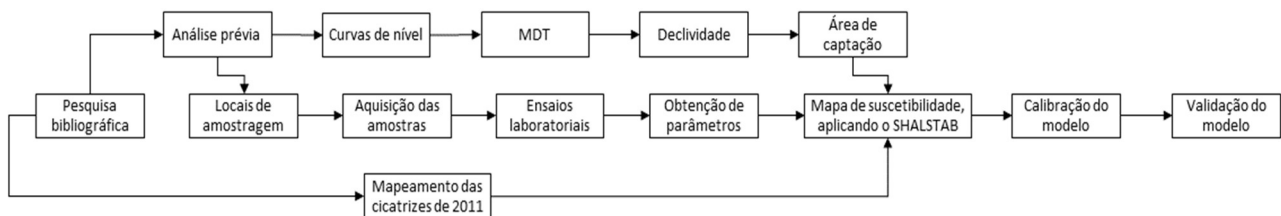


Figura 2 – Fluxograma da metodologia adotada.

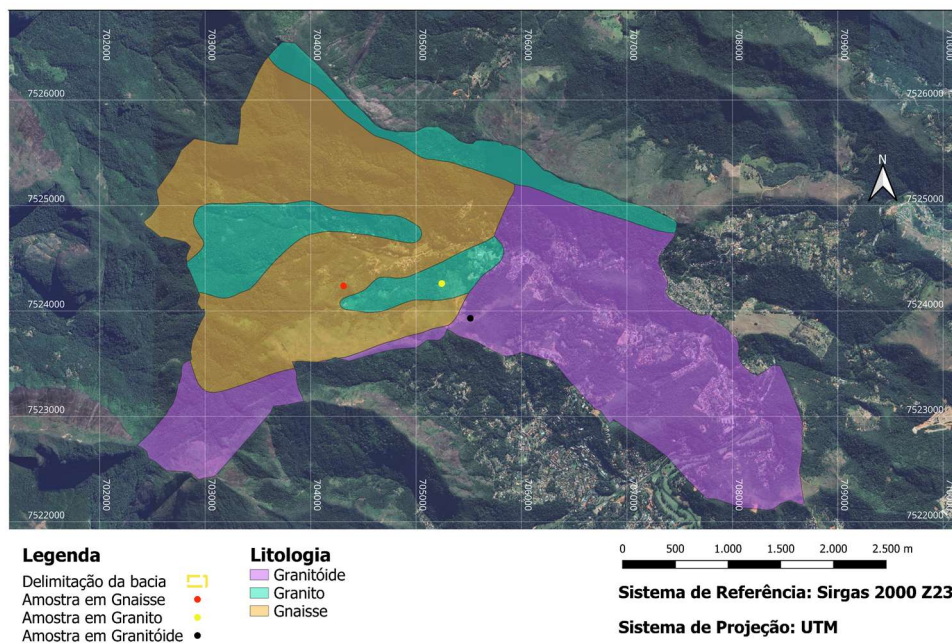


Figura 3 – Mapa de identificação das litologias da Bacia do Córrego do Príncipe. Adaptado de IBGE (2024) e Google Earth (2024).

O modelo empregado pelo programa SHALSTAB admite que as rupturas ocorrem devido a elevação do NA em uma situação de fluxo paralelo a superfície do terreno. Entretanto, sabe-se que os deslizamentos na serra do mar podem ser causados por perda de sucção da camada superficial do solo (Avelar, 2013). Embora não tenham sido realizados ensaios de medida de sucção, a comparação entre os resultados de ensaios na umidade natural e submersos, fornecem um importante indicativo da sucção nos solos estudados.

Como as camadas de solo possuem espessura relativamente pequena e os escorregamentos ocorreram durante períodos de chuva intensa e prolongada, admitiu-se que o solo se encontrava em condição saturada e que parte considerável dos escorregamentos ocorreu por elevação do lençol freático. Foram adotados parâmetros de resistência obtidos de ensaios cisalhamento direto com amostras submersas em água após 24 horas antes de cisalhar, para reproduzir as condições do solo em 2011. Além disso, foi considerado que as rupturas ocorreram no solo residual maduro.

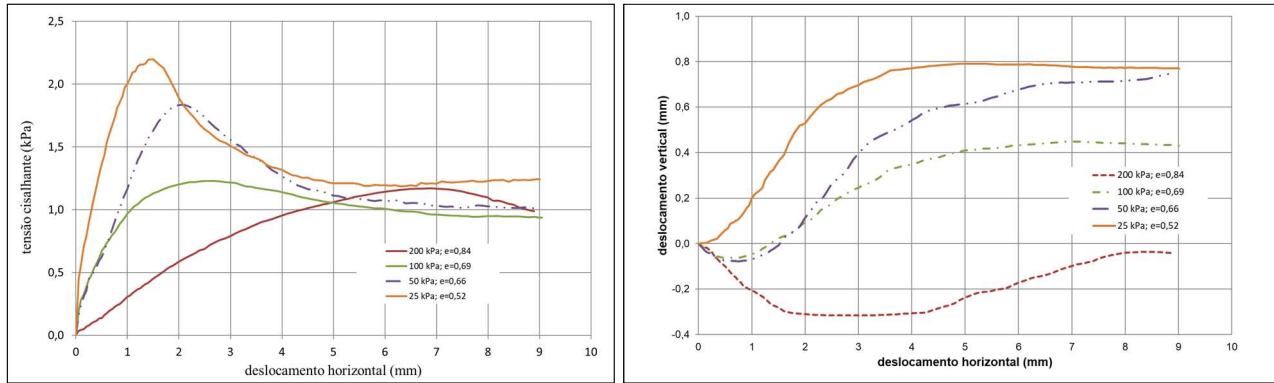


Figura 4 – (a) Tensão Cisalhante normalizada x deslocamento horizontal. (b) Deslocamento vertical x Deslocamento horizontal na umidade natural (SRJ de gnaisse).

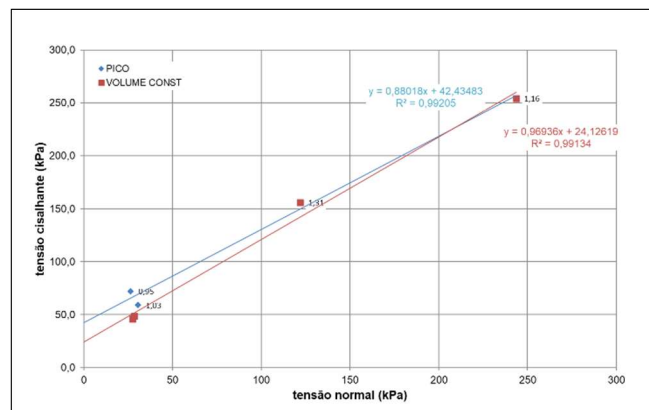


Figura 5 – Envolvórias de resistência de pico e volume constante na umidade natural (SRJ de gnaisse).

Tabela 1 – Resumo das envoltórias de resistência dos solos ensaiados.

Rocha mãe	Solo	Condição	e_0^{**}	e_f	ϕ' (°)	c' (kPa)
Granitóide	SRM	Submerso	0,88 - 1,02	0,65 - 0,97	41	4
	SRM	Umid. Nat.	0,90 - 1,03	0,68 - 1,02	45	11
Granito	SRM	Submerso	0,95 - 1,23	0,54 - 1,07	39	11
	SRM	Umid. Nat.	0,95 - 1,31	0,88 - 1,01	42 - 44*	42 - 24*
	SRJ	Submerso	0,58 - 0,78	0,57 - 0,91	40	23
	SRJ	Umid. Nat.	0,52 - 0,84	0,51 - 0,72	45	33 - 4*
Gnaisse	SRM	Submerso	0,74 - 1,07	0,74 - 1,07	40	15
	SRJ	Submerso	0,87 - 1,26	0,64 - 0,93	39	13 - 6*

* Valores dos parâmetros de resistência na condição de volume constante.

** Valores obtidos após moldagem para as amostras coletadas.

Tabela 2 – Coeficiente de condutibilidade hidráulica a 20°C (cm/s).

Rocha mãe	Solo	25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa
Granitóide	SRM	1,15E-03	1,10E-03	7,86E-04	4,08E-05

Granito	SRM	1,68E-03	1,67E-03	3,01E-05	1,68E-05
Gnaiss	SRM	6,78E-04	5,68E-04	3,54E-04	3,10E-04

3.3 Modelo SHALSTAB

O software SHALSTAB é definido como um modelo matemático determinístico que calcula a suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos, resultante da combinação de dois modelos: um de estabilidade de encostas (equação 1), baseado no método do talude infinito (Skempton e DeLory, 1957) e outro hidrológico (*steady-state* para fluxo paralelo ao nível do terreno) (equação 2) desenvolvido por O’Loughlin (1986). O software permite estimar o volume de chuvas necessário para provocar escorregamento em cada ponto do terreno (equação 3).

Cabe ressaltar que, para a execução do *software*, são necessários parâmetros topográficos (modelo digital de elevação, declividade e área de contribuição) e parâmetros do solo (ângulo de atrito, coesão, espessura de solo e peso específico), conforme Dietrich & Montgomery (1998). O modelo hidrológico utilizado se baseia no estado uniforme de recarga que simula a variação da altura d’água no solo em um período chuvoso (O’Loughlin, 1986).

$$\frac{h}{z} = \left(\frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} \right) + \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \quad (1)$$

$$\frac{h}{z} = \left(\frac{Q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin \theta} \right) \quad (2)$$

$$\frac{Q}{T} = \frac{\sin \theta}{a \cdot b} \left(\left(\frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} \right) + \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right) \quad (3)$$

Nas equações acima, h é altura do lençol freático (m), z é a espessura vertical do solo (m), c' é a coesão efetiva do material (kPa), ρ_s é a massa específica do solo (kg/m^3), g é a aceleração da gravidade (m/s^2); θ é a declividade do ponto analisado (grau), ρ_w é a massa específica da água (kg/m^3), ϕ é o ângulo de atrito do solo (graus), Q é a precipitação estacionária (mm/dia), T é a transmissividade (m^2/dia), “ a ” é a área de contribuição (m^2) e “ b ” é a largura da seção de saída (tamanho do pixel, m).

Além disso, para a confecção dos parâmetros de entrada foi utilizado o *software* QGIS, que é um programa de sistema de informação geográfica (SIG) que permite realizar, editar e analisar dados geoespaciais.

Para a calibração do modelo, foram realizadas retroanálises, comparando o resultado do SHALSTAB com as cicatrizes de 2011 na bacia do Córrego do Príncipe, representadas na Figura 1.

4 RESULTADOS

Utilizando os parâmetros obtidos em laboratório e o modelo digital de elevação, foram obtidos os resultados exibidos na Figura 6. Para comparação, as cicatrizes das rupturas de 2011 foram adicionadas ao mapa em cor roxa. Um ponto importante é que a precipitação acumulada registrada no período de estudo foi de 241,8 mm/dia.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Analisando o resultado do modelo construído, é possível verificar que a locação das regiões com rupturas se mostrou satisfatória. No entanto, para as precipitações deflagradoras, tendo como parâmetro a chuva de 2011, estas não se mostraram, em sua maioria, satisfatórias, uma vez que há manchas vermelhas (incondicionalmente instáveis) na face ao norte da bacia de estudo, além dos deslizamentos com baixa precipitação (entre 0 e 50 mm/dia). Sendo assim, para uma melhor calibração do modelo, decidiu-se alterar a condutibilidade hidráulica, pois esse parâmetro é o que tem maior faixa de variação e afeta significativamente as poropressões geradas pelo modelo. Além disso, nas inspeções de campo, foi possível constatar, em vários taludes com solo exposto, que o solo natural apresentava orifícios de diâmetro considerável, causados por animais ou vegetação (Figura 7). Esses “túneis” podem causar um significativo acréscimo na permeabilidade.

Isso leva a crer que seja preciso considerar um fator de escala para a permeabilidade, pois a permeabilidade global do maciço de solo é maior do que o valor determinado em ensaios com amostras de 63,5 mm de diâmetro.

Na análise inicial foi utilizada a permeabilidade de $1 \cdot 10^{-3}$ cm/s, conforme resultado dos ensaios de laboratório. Após a calibração, a permeabilidade para as regiões de solo residual de granito e de gnaiss foram de $2 \cdot 10^{-3}$ cm/s e de $7 \cdot 10^{-3}$ cm/s para a região de solo residual de granitóide, conforme Figura 8. variando este parâmetro foi possível observar que, para valores menores de permeabilidade, a chuva necessária para deflagrar o movimento de massa também é menor. Tal fato pode ser explicado pela equação (2), ou seja, quando a permeabilidade é menor, o nível d'água se mantém mais elevado no solo e atinge o fator crítico para a estabilidade do talude. A Figura 8 ilustra o resultado calibrado.

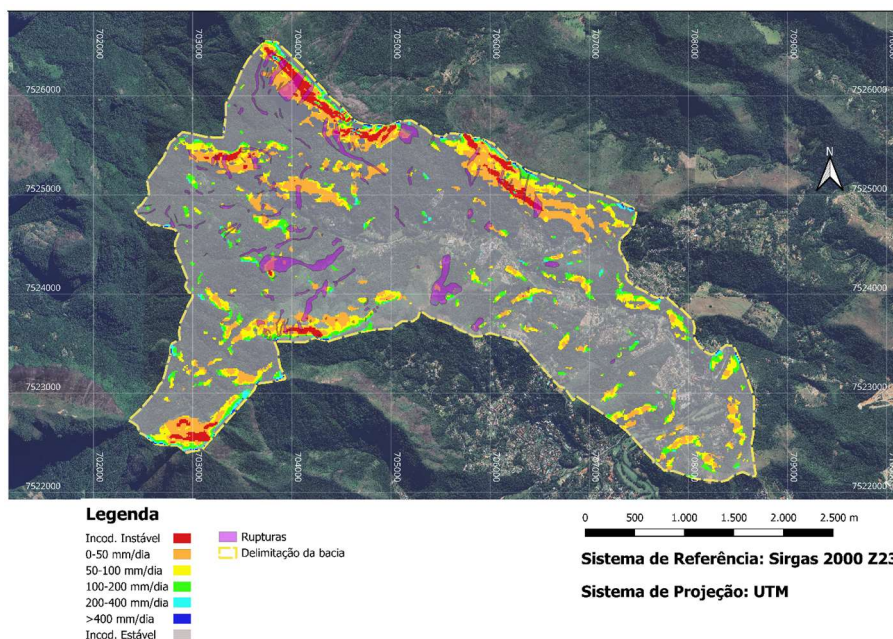


Figura 6 – Mapa de suscetibilidade a movimentos translacionais empregando parâmetros de resistência e permeabilidade determinados em laboratório.



Figura 7 – Orifícios identificados no maciço.

6 CONCLUSÕES

A análise realizada permitiu identificar que vários pontos da bacia eram suscetíveis a escorregamentos translacionais em condições de chuva semelhantes à de 2011. Foi realizado um ajuste na permeabilidade dos solos para que fosse obtido um melhor ajuste entre previsão e os escorregamentos ocorridos. Este ajuste é justificável pelas identificações de macroporosidade em campo. Entretanto, sabe-se que outros fatores podem estar correlacionados a esta variabilidade, como a espessura de solo, heterogeneidade espacial dos solos, etc.

A simulação exata das condições de pontos específicos exigirá levantamentos detalhados da estratigrafia e dos valores locais dos parâmetros e do solo, o que não é viável na avaliação de grandes bacias.

Pretende-se realizar análises mais detalhadas utilizando um modelo digital de elevação com melhor resolução e coletando amostras de solos de outros pontos, para conhecer melhor a variação espacial da resistência. O modelo hidrológico mostrou-se bastante sensível ao valor da permeabilidade do solo, o que pode representar uma dificuldade, tendo em vista a larga faixa de variação usual desse parâmetro.

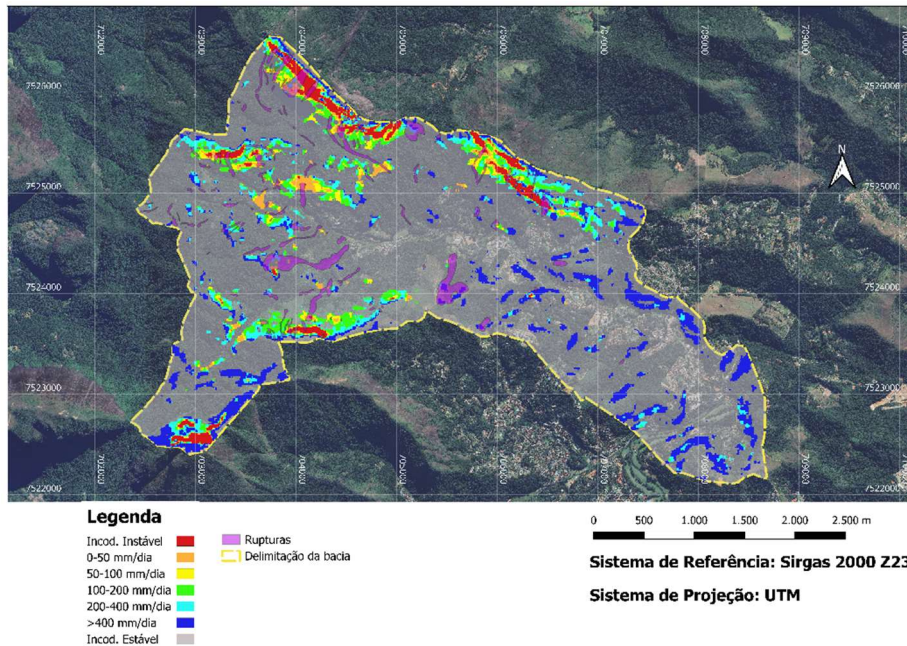


Figura 8 – Mapa de suscetibilidade a movimentos translacionais após calibração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASF – Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center. Disponível em: <https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar/>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- AVELAR, *et al.* Geomorfologia, Mecanismos e Comportamento dos Solos do Movimento de Massa da Posse–Teresópolis, Rio de Janeiro. Conf. Bras. Sobre Estabilidade de Taludes, COBRAE, Angra dos Reis, CD-ROM, 2013.
- Azevedo, *et al.* Estimativa da profundidade do solo pelo uso de técnicas de geoprocessamento, estudo de caso: Setor Pajarito, Colômbia, XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE, João Pessoa, PB, Brasil, INPE, Vol. 1, p. 4551-4558. 2015.
- CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/deslizamentos/>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- CENAD *et al.* Anuário Brasileiro de Desastres Naturais 2011. Brasília, Rio de Janeiro, 2012.
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Disponível em: <https://geoportal.sgb.gov.br/geosgb/>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- DOURADO, F. *et al.* O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro: as causas do evento, os mecanismos dos movimentos de massa e a distribuição espacial dos investimentos de reconstrução no pós-desastre. Anuário do Instituto de Geociências, v. 35, n. 2, p. 43-54, 2012.
- GOOGLE EARTH WEBSITE. Disponível em: <https://earth.google.com/web/search/Posse,+Teres%C3%B3polis+-+RJ/@-22.36923521,-43.01525762,1079.59128453a,4102.80815332d,35y,-60.98567528h,36.36596599t,-0r/data=CigiJgokCVIiEjmlXDbAEYfLig2xZTbAGVOC-kQce0XAIfpOqEM6hUXAOgMKATA>. Acesso em: 05 mar. 2024
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html>. Acesso em: 10 mar. 2024.

- MONTGOMERY, D. R.; SULLIVAN, K.; GREENBERG, H. M. Regional test of a model for shallow landsliding. *Hydrological Processes*, v. 12, n. 6, p. 943-955, 1998.
- SITE Oficial da Prefeitura de Teresópolis. Disponível em: <http://www.teresopolis.rj.gov.br/>. Acesso em: 01 jun. 2024.
- O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. *Water Resources*, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986
- SKEMPTON, A. W. DELORY, F. A. (1957). Stability of Natural Slopes in London Clay. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (London)*. 378-381.