

# Avaliação da Infiltração em Área de Risco de Deslizamento na Região de Petrópolis/RJ Utilizando Hydrus-1d: Comparação entre Pedofunção Rosetta e Modelagem Inversa

Cristiane Ribeiro de Melo

Pesquisadora em geociências, Serviço Geológico do Brasil, Recife, Brasil, [cristiane.melo@sgb.gov.br](mailto:cristiane.melo@sgb.gov.br)

Marta Vasconcelos Ottoni

Pesquisadora em geociências, Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, [marta.ottoni@sgb.gov.br](mailto:marta.ottoni@sgb.gov.br)

Marcos Barreto de Mendonça

Professor, Programa de Engenharia Ambiental - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, [mbm@poli.ufrj.br](mailto:mbm@poli.ufrj.br)

**RESUMO:** O aumento da poropressão devido à infiltração de água da chuva é um fator deflagrador de deslizamentos. Modelos de balanço hídrico do solo podem ser utilizados para se estimar o grau de saturação e a poropressão correspondente. O presente trabalho avaliou a infiltração da água de chuva, considerando o cenário de pluviometria ocorrido no bairro Quitandinha (Petrópolis/RJ) em período antecedente ao desastre de 15/02/2022. Na metodologia foi utilizado o Hydrus-1D para duas formas de determinação dos parâmetros hidráulicos do solo: uma baseada na pedofunção Rosetta e outra considerando dados de campo (método inverso). Foram considerados os períodos de 24h e 96h de pluviometria antecedentes ao evento, que formam o par de períodos mais relevante para observação das probabilidades de deslizamento na região, visando avaliar o acumulado de precipitação e infiltração simulada. Os resultados mostram que a infiltração simulada usando o método inverso foi maior do que a usando a pedofunção Rosetta. A simulação da infiltração por meio da modelagem inversa pode ser considerada de maior confiabilidade pelo fato de reproduzir os parâmetros hidráulicos amostrais com mais acurácia, enquanto o Rosetta pode levar a predições imprecisas. Os resultados das simulações quando analisados em conjunto com a precipitação podem auxiliar na previsibilidade de deslizamentos, através da investigação da poropressão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Caracterização do solo, Modelo Hydrus-1D, Propriedades hidráulicas do solo.

**ABSTRACT:** Increased porosity due to rainwater infiltration is a triggering factor for penetration. Soil water balance models can be used to estimate the degree of saturation and the corresponding pore pressure. The Quitandinha neighborhood (Petrópolis, RJ) historically presents a high frequency of penetration. This work considered the rainfall scenario in the period prior to the February 15, 2022, disaster. The Hydrus-1D methodology was used to determine soil hydraulic parameters in two ways: one based on the Rosetta pedofunction and the other considering field data (inverse method). The 24- and 96-hour periods preceding the event were considered, considered the most relevant pair of periods for observing the probabilities of penetration in the region, to evaluate the accumulation of occurrences and simulated infiltration. The results show that infiltration using the inverse method was greater than using Rosetta. Infiltration simulation using inverse modeling can be considered more reliable because it reproduces sample hydraulic parameters more accurately, whereas Rosetta can lead to inaccurate predictions. Simulation results, when analyzed in conjunction with actual occurrence, can aid in predicting penetration through the investigation of pore pressure.

**KEYWORDS:** Soil characterization, Hydrus-1D model, Soil hydraulic properties.

## 1 INTRODUÇÃO

Os eventos de deslizamento têm ocorrido em número cada vez mais frequente no Brasil (Alvalá e Barbieri, 2017), como consequência dos extremos climáticos mais intensos e do avanço das ocupações desordenadas em áreas de risco, sem o efetivo controle público. A ampliação do conhecimento sobre os fatores

e processos que condicionam esses eventos é uma estratégia essencial na definição de políticas públicas voltadas à temática do perigo de deslizamento e sua vulnerabilidade social.

A infiltração acumulada nos dias que antecedem os deslizamentos é um dos processos que desencadeiam esses eventos. A determinação do processo de infiltração em campo é uma atividade laboriosa que demanda muito tempo, recursos e grande volume de água para realização dos testes, o que nem sempre é viável, especialmente em locais de difícil acesso. Dessa forma, recorre-se a modelos matemáticos de balanço hídrico no solo, que geralmente se baseiam na resolução numérica da equação de Richards. Esse modelo simula a variação da umidade ao longo do tempo, que é dependente das propriedades hidráulicas do solo (Silva Júnior e Sousa, 2019).

Essas propriedades podem ser medidas em laboratório ou em campo, sendo usualmente dada preferência aos métodos laboratoriais, que são realizados na escala da amostra de solo, quando se pretende simular de forma mais detalhada os processos hidrológicos ao longo dos horizontes que compõem o perfil do solo em estudo. Quando há dificuldade na determinação dessas propriedades em laboratório, faz-se uso das pedofunções (Bouma, 1989). Estes são modelos matemáticos lineares ou não lineares, que estimam as propriedades hidráulicas por meio de outras propriedades do solo de mais fácil quantificação, como as frações granulométricas. No entanto, reconhece-se, segundo a literatura, que o uso das pedofunções na predição das propriedades hidráulicas a partir somente da granulometria não permite estimativas com alta acurácia, uma vez que essas propriedades são fortemente afetadas pela estrutura do solo (Pachepsky *et al.*, 2006).

Outro mecanismo para obtenção das variáveis hidráulicas no solo é a utilização da modelagem inversa a partir de dados observacionais. Na modelagem direta, utiliza-se de dados das propriedades hidráulicas previamente conhecidas, obtidas em laboratório ou por meio de pedofunções para simular os processos hidrológicos no perfil de solo. Na modelagem inversa ocorre o caminho oposto: os parâmetros hidráulicos são ajustados para reproduzir, pela equação de Richards, o comportamento observado no campo ou em experimento. Um dos grandes benefícios dessa metodologia é reduzir a necessidade de medições diretas extensas, que podem ser caras e demoradas, especialmente em locais de difícil acesso. Por outro lado, a qualidade e confiabilidade das estimativas dependem fortemente da qualidade e quantidade dos dados.

O Hydrus-1D (Šimůnek *et al.*, 2008) é um dos programas mais utilizados na simulação dos processos hidrológicos na escala do perfil do solo (Silva Júnior e Sousa, 2019), mostrando-se muito eficiente na reprodução da infiltração de água, sendo amplamente empregado em estudos de avaliação de suscetibilidade à contaminação de aquíferos, em projetos de irrigação, entre outros (Aquino *et al.*, 2015). No entanto, não se observa seu uso na simulação de infiltração em estudos de movimentos de massa. O Hydrus-1D utiliza o modelo de Richards e considera condições de contorno superficiais, como a precipitação, e subsuperficiais, variáveis de acordo com o processo hidrológico a ser simulado. A entrada das propriedades hidráulicas pode ser feita a partir de dados reais de campo ou por estimativas baseadas em pedofunções (modelo Rosetta) - Schaap *et al.* (2001), ou ainda empregando a modelagem inversa em caso de conhecimento de dados de infiltração medidos em campo.

O presente trabalho visou investigar a viabilidade do uso do modelo Rosetta para simulação da infiltração, tendo como estudo de caso uma localidade no bairro Quitandinha, Petrópolis, região Serrana do Rio de Janeiro, submetida a pluviometria ocorrida em período antecedente ao desastre relacionado a movimentos de massa de 15/02/2022. Utilizou-se o modelo matemático Hydrus-1D para duas formas de determinação dos parâmetros hidráulicos do solo: uma baseada na pedofunção Rosetta e outra considerando a modelagem inversa. Ressalta-se que o trabalho não buscou avaliar o efeito da infiltração na deflagração de deslizamentos, sendo este o objetivo de etapas futuras da pesquisa.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O bairro Quitandinha, faz parte do primeiro distrito do município de Petrópolis onde há a maior concentração de urbanização regional (Figura 1). No bairro, a ampliação de áreas urbanizadas em locais inapropriados tem repercutido em eventos frequentes de enchentes e de deslizamentos, desencadeando desastres socioambientais na região (Guerra *et al.*, 2009). A avaliação do solo no bairro Quitandinha, apresentada por Marques (2016), referente à rua Mato Grosso, mostrou um ambiente majoritariamente arenoso.

O comportamento das máximas de chuva de 24 horas, registradas anualmente no bairro para o período de 1961 a 2022 foi avaliado por Melo *et al.* (2024a). Nesse exercício foram utilizados os dados pluviométricos das estações do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – Cemaden (estação Rua

Araruama), localizada no bairro, com início de operação em 2015, conjugados aos dados pluviométricos mais antigos do Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD), disponibilizados em Xavier *et al.* (2024). O estudo mostra que na última década houve um aumento nas máximas de 24 horas, aumentando os perigos de deslizamento na região. A Figura 2 ilustra a distribuição das máximas diárias por década obtida do estudo de Melo *et al.* (2024a). Os pontos 1 a 4 referem-se aos pontos da malha/grid BR-DWGD, que compõem os vértices do polígono onde o bairro está inserido, e os dados de precipitação da estação Rua Araruama, do Cemaden.

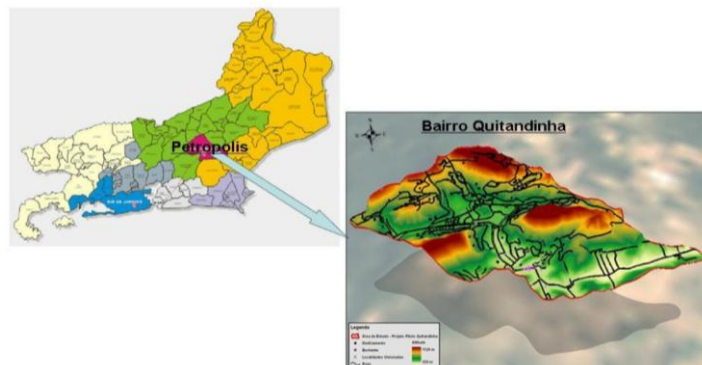


Figura 1. Mapa de localização do bairro Quitandinha, Petrópolis/RJ. Fonte: Guerra *et al.*, 2009.

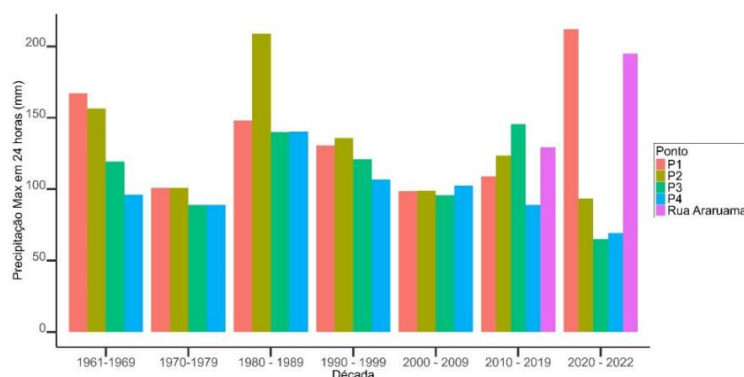


Figura 2. Distribuição das máximas diárias por década. Fonte: Melo *et al.*, 2024a.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia para simulação da infiltração no solo foi realizada em três etapas no Hydrus 1D. Na Fase I a infiltração foi simulada (umidade x tempo) para dados estimados das propriedades hidráulicas por meio da pedofunção Rosetta, levando-se em consideração as informações de composição granulométrica do solo obtidas em campo (Perfil do solo, Figura 3).

Na Fase II, utilizou-se o método inverso do modelo Hydrus1D, tendo como valor inicial dos parâmetros os resultados do Rosetta obtidos na Fase I e informando os teores de umidade medidos pela sonda de umidade instalada em local próximo à área analisada. Simulou-se novamente o Hydrus1D a partir do resultado dos parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa para obtenção dos valores de umidade no tempo. Optou-se, nesta fase, por simular o evento de infiltração utilizando os parâmetros obtidos a partir da modelagem inversa, em vez de empregar diretamente as informações reais de umidade do sensor selecionado (item 3.2). Essa decisão deve-se ao fato de o sensor de umidade estar localizado a certa distância do perfil de solo onde as simulações foram conduzidas, o que poderia comprometer a representatividade dos resultados.

Além disso, a modelagem inversa foi conduzida com o objetivo de incorporar características específicas do perfil de solo em estudo. Para isso, foram utilizados como valores iniciais das propriedades hidráulicas do solo aqueles estimados a partir de dados locais de granulometria (Fase I), destacando-se que os resultados finais dos parâmetros obtidos por modelagem inversa são sensíveis aos valores iniciais adotados. Dessa forma, a simulação da infiltração por meio da modelagem inversa possibilita reproduzir, ainda que parcialmente, as condições reais do local, conferindo maior realismo e confiabilidade aos resultados.



As infiltrações em mm ocorridas nas Fases I e II foram comparadas e analisadas em conjunto com a precipitação. Essa comparação também foi realizada para os dados acumulados de infiltração e precipitação antecedentes de 24 horas e 96 horas para o evento ocorrido em 15/02/2022, compondo a Fase III.

A Figura 3 ilustra a localização da estação pluviométrica utilizada no estudo, a sonda de umidade do solo operada pelo Cemadem (Quitandinha - Geo), o ponto onde foram realizadas as amostragens de solo e simulações no Hydrus-1D e os locais de deslizamento registrados no bairro Quitandinha.

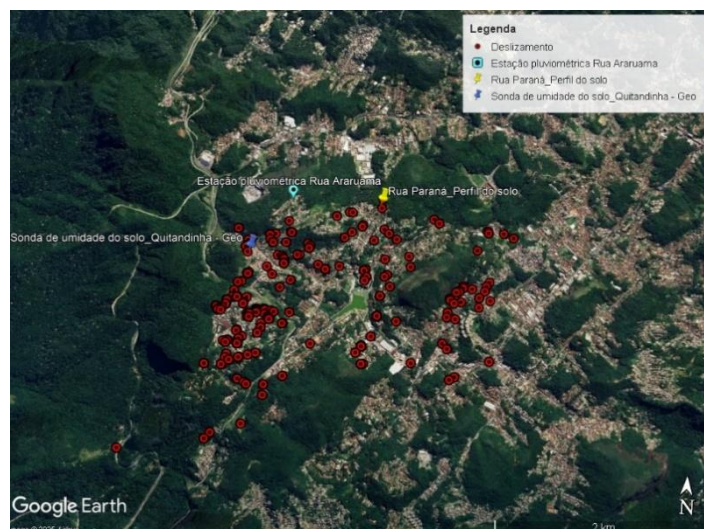


Figura 3. Localização das fontes de dados (precipitação, umidade do solo e caracterização do solo) e os pontos com registros de deslizamentos. Fonte: Google Earth, 2025.

### 3.1 Série de dados pluviométricos

A série de precipitação utilizada corresponde aos dados da estação pluviométrica automática Rua Araruama (cód. 2243432), Quitandinha, instalada em 2015, e operada pelo Cemaden. Os registros disponibilizados na internet pela operadora (Cemaden, 2025), observados a cada 10 minutos, foram transformados em totais diários (24 horas). A qualidade das informações foi verificada através de análise de consistência simplificada apresentada por Melo *et al.* (2024b).

### 3.2 Série de dados de umidade do solo

A série de umidade do solo foi obtida da estação Quitandinha – Geo (cód. 330390601G), que é uma Plataforma de Coleta de Dados Geotécnicos (PCD Geo) monitorada pelo Cemaden. A sonda específica para monitoramento de umidade da zona não saturada mede a umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ), a cada 10 minutos (período de monitoramento de 2021 a 2024).

Os sensores de capacitância instalados no solo (EnviroSCAN, da Sentek) registram o volume de água a cada 0,5 m em 6 profundidades, sendo a primeira sonda instalada a 0,5 m (Melo *et al.*, 2023). Foram utilizadas somente as informações registradas pelos sensores instalados nas profundidades de 1,0 m e 1,5 m para realização do modelo inverso. Foram nessas profundidades onde se determinaram as frações granulométricas no perfil de solo (Figura 3 e item 3.3). Os teores de umidade medidos a cada 10 min foram transformados em valores de umidade média diária, para serem comparados aos acumulados precipitados de 24 horas e 96 horas.

### 3.3 Caracterização do solo

As análises granulométricas da região estudada foram realizadas por meio de prospecção de amostras de solo em área florestada na rua Paraná (22°31'11.00"S e 43°12'41.00"O), obtidas nas profundidades de 1,0 m e 1,5 m. O ponto onde foram realizadas estas análises está localizado próximo dos locais de deslizamentos na região (Fig. 3). A área florestada foi escolhida com o objetivo de representar as características da região em

solo não alterado antropicamente. Para compatibilizar os resultados da simulação no Hydrus1D, a profundidade de coleta das amostras foi a mesma dos sensores de umidade.

### 3.4 Hydrus (módulo 1D)

O balanço hídrico do solo foi realizado utilizando o modelo Hydrus-1D, que simula o movimento unidimensional de água, baseado na Equação de Richards, para o fluxo de água em ambientes porosos. Os principais dados de entrada são a precipitação, as características e propriedades do solo.

A simulação no Hydrus-1D foi realizada para o perfil de 1,5 metros, sendo subdividida em duas camadas, de acordo com as profundidades de coleta de solo da prospecção. O modelo hidráulico analítico escolhido para avaliar a infiltração foi o de Van Genuchten (1980), sem consideração da histerese do solo, submetido à pressão atmosférica com escoamento e drenagem livre.

O período da série histórica de chuva utilizado como dado de entrada foi de 11/11/2021, data de instalação da sonda, até 28/02/2022, data próxima ao período em investigação pelo presente trabalho, quando ocorreu o desastre associado a movimentos de massa de 15/02/2022. A modelagem foi iniciada em data muito anterior ao período de análise estabelecido para possibilitar o treinamento do modelo. Em função da grande antecedência do início da série histórica em relação ao período analisado, pode-se considerar desprezível a influência das condições de saturação pré-existentes. Não foi objetivo do trabalho investigar as poropressões que justificassem a deflagração dos deslizamentos, mas tão somente comparar as simulações de fluxo usando os parâmetros hidráulicos estimados por meio do Catálogo Rosetta de solos e pela modelagem inversa.

#### 3.4.1 Catálogo de solos Rosetta

O módulo Rosetta Lite do Modelo Hydrus-1D permite a utilização de dados da distribuição de tamanho de grão do solo para estimar os valores dos parâmetros da equação de Mualem-van Genuchten (Equação 1), esta utilizada na formulação de Richards. A estimativa desses parâmetros pode também ser realizada para outros preditores, como a densidade do solo e o teor de carbono e para classes texturais.

$$k(\theta) = k_s * \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} * \left[ 1 - \left( 1 - \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \right)^{1/m} \right]^2 \dots\dots\dots(1)$$

Onde:  $k(\theta)$  é a condutividade hidráulica não saturada em função da umidade volumétrica;  $k_s$  é a condutividade hidráulica saturada;  $\theta$  é a umidade volumétrica em função do potencial matricial ( $h$ );  $\theta_r$  é a umidade volumétrica residual;  $\theta_s$  é a umidade volumétrica na saturação;  $m$  é um parâmetro de forma, a  $n$  ( $m = 1 - 1/n$ ); e  $n$  é um parâmetro de forma, relacionado à distribuição de tamanhos de poros.

O modelo Rosetta foi calibrado para um grande volume de dados, envolvendo solos agrícolas e não agrícolas, em zonas de clima temperado do hemisfério norte. Entretanto, o uso de Rosetta para outras zonas climáticas como as tropicais brasileiras, pode levar a predições imprecisas.

#### 3.4.2 Modelagem inversa

A modelagem inversa é utilizada para determinar os parâmetros do solo que não podem ser medidos diretamente através de amostragem e análise laboratorial. Dessa forma, o modelo usa dados medidos de outros aspectos do sistema, como a umidade do solo, e ajusta a equação de Richards para encontrar os valores dos parâmetros que melhor correspondem aos dados observados. Para tal são utilizados algoritmos de otimização para encontrar os valores dos parâmetros da Equação 1 que melhor se ajustam aos dados *in situ*.

### 3.5 Relação entre a pluviometria e o teor de umidade no solo em situação de deslizamento

Em seu trabalho, Gonzalez *et al* (2021) utilizam o conceito de dependência estatística para encontrar o par de períodos de chuva mais relevante para os episódios de deslizamentos e, a partir daí, calculam a probabilidade de ocorrência de deslizamentos em função da pluviometria, na região do Quitandinha. Estes autores concluem que há um pico de dependência no par de períodos 24 horas e 96 horas, de forma que este foi considerado o período mais relevante para observação das probabilidades de ocorrência de deslizamento.

#### 4 Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta o resultado dos teores de areia, silte e argila nas profundidades de 1,0 m e 1,5 m no ponto da rua Paraná, reforçando a afirmativa anterior de que a região é majoritariamente arenosa. Essas informações foram utilizadas como dados de entrada no modelo Rosetta do Hydrus-1D para predição dos parâmetros hidráulicos utilizados na equação de Mualem-van Genuchten para cada uma das profundidades (Tabela 2). De posse de tais dados e das informações diárias de precipitação do período entre 11/11/2021 e 28/02/22, obteve-se a infiltração simulada para o período (fase metodológica I). O mesmo processo foi repetido para a Fase II, utilizando-se os parâmetros hidráulicos otimizados pela modelagem inversa (Tabela 3).

Tabela 1. Composição granulométrica do solo (%) por profundidade

Profundidade (metro)	Argila	Silte	Areia
1,0	29	14	57
1,5	19	26	55

Tabela 2. Propriedades hidráulicas do solo – módulo Rosetta

Profundidade (metro)	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\alpha$ (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
1,0	0,0586	0,3917	0,00216	1,3835	172,2
1,5	0,0712	0,3901	0,00262	1,2913	113,2

Tabela 3. Propriedades hidráulicas do solo – modelagem inversa

Profundidade (metro)	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\alpha$ (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
1,0	0,1523	0,4445	0,00212	1,0900	132,1
1,5	0,0621	0,4738	0,00146	1,4400	72,5

Os resultados dos parâmetros hidráulicos (Tabelas 2 e 3) apresentaram valores distintos para os dois métodos, o que induziu a reprodução de processos diferentes de simulação da infiltração.

As infiltrações simuladas, obtidas como resultado das Fases I e II, são apresentadas na Figura 4. Observa-se que os picos de infiltração, simulados pelo modelo Hydrus com uso dos parâmetros hidráulicos estimados pelas duas metodologias distintas descritas no estudo, apresentaram diferenças de valores expressivas. No início do período de infiltração simulado, os picos dos dois métodos são aproximadamente coincidentes, o que, posteriormente, não ocorre mais. Além disso, observa-se que em alguns casos há picos produzidos por um método e ausência de picos pelo outro na mesma data. Para todo o período analisado, a modelagem inversa (linha amarela) produziu picos maiores em relação à modelagem pelo método Rosetta (linha vermelha). O total infiltrado para o método inverso, entre os dias 11/11/2021 e 28/02/22, foi 16% maior do que para o método Rosetta.

Para a fase metodológica III, a Tabela 4 apresenta o acumulado de chuva de 24 horas e 96 horas antecedentes ao deslizamento de 15/02/2022, em relação aos volumes infiltrados acumulados nos mesmos períodos no perfil total do solo (0-1,5 m). A modelagem inversa também apresentou um total infiltrado maior nos períodos de 24 horas e 96 horas antecedentes ao evento de 15/02/2022.

Considera-se que o resultado da simulação por meio do uso das propriedades hidráulicas estimadas pela modelagem inversa é de maior confiabilidade pelo fato de reproduzir os dados observados de umidade. Apesar do ponto de amostragem de solo ser distante do local onde a sonda de umidade está instalada, aproximadamente 1,5 km, o que pode causar distorções nos resultados do modelo inverso, o modelo inverso ainda é o método mais confiável, podendo ser utilizado para estimar dados de infiltração em períodos com ausência de dados na sonda.

A simulação necessita ser estimada com precisão para que seja possível reproduzir o comportamento do solo em períodos sem registro de umidade pela sonda. Os resultados das simulações de infiltração quando analisados em conjunto com a precipitação podem auxiliar na previsibilidade de deslizamentos, por meio da investigação da poropressão associada a umidade reproduzida pelo modelo, como em Melo *et al.* (2021).

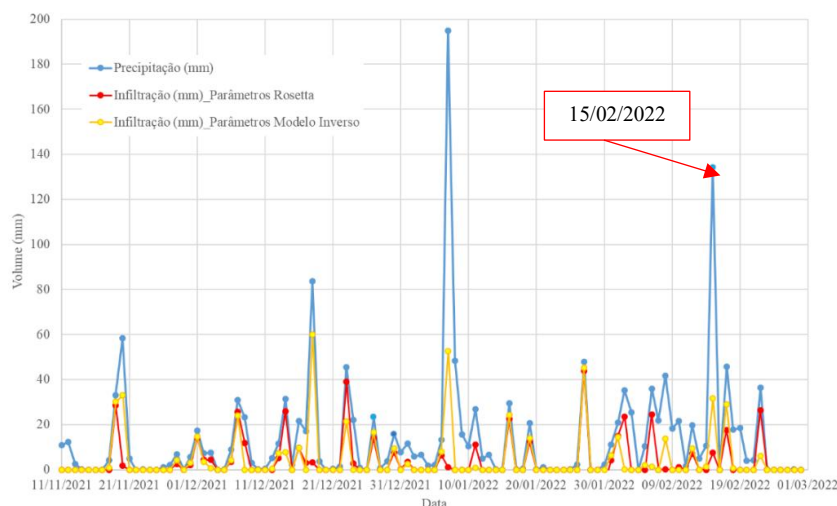


Figura 4. Dados de infiltração simulados utilizando o módulo Rosetta e a modelagem inversa

Tabela 4. Volumes infiltrados (mm) em relação aos acumulados de chuva no dia 15/02/2022

Acumulados (h)	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	
		Rosetta	Método Inverso
24	134,1	7,47	31,55
96	169,2	14,54	42,40

## 5 CONCLUSÃO

Diante de um quadro de alta suscetibilidade das encostas do bairro do Quitandinha, Petrópolis (RJ), a deslizamentos, este trabalho avaliou a influência do método de definição de parâmetros hidráulicos do solo na simulação da infiltração de água no solo no período antecedente ao desastre de 15/02/2022, utilizando o modelo Hydrus-1D. Foram comparados os resultados obtidos a partir de parâmetros definidos pela pedofunção do modelo Rosetta com aqueles resultantes da aplicação do método inverso considerando dados de campo.

A metodologia utilizada para investigar as diferenças das séries de infiltração mostrou que o uso dos parâmetros a partir do modelo inverso resultou em um total infiltrado para todo o período simulado 16% maior em relação ao emprego dos parâmetros pelo Rosetta. Quando considerados somente os períodos de pluviometria com os quais os deslizamentos da região têm uma maior dependência (24h e 96h, antecedentes), o total infiltrado estimado usando parâmetros pelo método inverso é ainda muito maior que o calculado pelo Rosetta. Tais observações permitem concluir que o método de definição dos parâmetros hidráulicos tem uma influência significativa. No caso estudado, o uso da pedofunção Rosetta se mostra contra a segurança, por subestimar a infiltração. Pode-se atribuir essa diferença ao fato de o modelo Rosetta ser calibrado para solos de clima temperado do hemisfério norte, não representando zonas climáticas tropicais brasileiras.

Deve-se ressaltar, por fim, que o trabalho não considerou o efeito da cobertura do solo, que no caso é o da vegetação local, no processo de infiltração e fluxo da água. Como abordado, o presente trabalho faz parte de uma pesquisa em andamento que visa melhorar a predição de deslizamentos deflagrados por chuva.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Serviço Geológico do Brasil (SGB) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que possibilitaram a realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aquino, A. M., Sanches, L., Salomão, F. X. T., Alves, M. C., Shiraiwa, S., Nogueira, J. S. (2015) Propriedades hidráulicas do solo estimadas pelo Rosetta em área de *Vochysia divergens* Pohl no Pantanal. In: XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Natal – RN.





- Alvalá, R. C., BARBIERI, A. F. (2017). Desastres naturais. *Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar*. São José dos Campos, SP: Inpe, 1, 203-230.
- Bouma, J. (1989). Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*, 9, 177–213. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_5).
- Cemaden. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. (2025). *Estações*. Disponível em: <<http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- Gonzalez, F. C. G.; Mendonça, M. B.; Coelho, G. V. S. (2021) Probabilidade de ocorrência de deslizamentos em função da pluviometria aplicada à bacia do rio Quitandinha, Petrópolis-RJ. In: VIII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Porto de Galinhas – PE.
- Google Earth. Brasil. (2025). Disponível em: <<http://www.google.com/earth>>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- Guerra, A. J. T., Mendonça, M. B., Lopes, P. B. M., Lima, F. S., Jorge, M. C. O., Mendes, B. R. (2009) Criação de um Sistema de Previsão e Alerta de Riscos a deslizamentos e enchentes, visando minimizar os impactos socioambientais no bairro Quitandinha, bacia do rio Piabanha (afluente do Paraíba do Sul), município de Petrópolis-RJ. In: II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e sustentabilidade. Taubaté - SP. Pp. 785-824.
- Marques, M. D. S. (2016). O estudo da estabilidade de encostas na rua Mato Grosso no bairro de Quitandinha, Petrópolis-RJ, através do radar de penetração do solo (GPR). Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2016.xvii.
- Melo, C. R. D., Guedes, P. A., Amorim, S. F., Alves, F. H. B., & Cirilo, J. A. (2021). Combined analysis of landslide susceptibility and soil water dynamics in a metropolitan area, northeast Brazil. *Soils and Rocks*, 44, e2021051420.
- Melo, C. R., Ottoni, M. V., Guedes, P. A., Melo, S. C. (2023) Análise Comparativa entre a Umidade do Solo Medida In Situ e com Uso de Modelo Matemático Computacional, para Evento de Deslizamento em Recife. In: XXV SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracajú – Sergipe. *Anais... ABRHidro*.
- Melo, C. R., Silva, V. O., Guedes, P. A., Crispim, A. K. N. (2024a) Validação da Série de Dados Pluviométricos BR-DWGD (1961 a 2022) para o Bairro do Quitandinha, Petrópolis/RJ. In: IV Encontro Nacional de Desastres. Curitiba - PR. *Anais... ABRHidro*.
- Melo, C. R., Crispim, A. K. N., Melo, S. C., Santos, K. A., Guedes, P. A. (2024b) A Importância da Consistência das Séries Pluviométricas Utilizadas em Projetos. Estudo de Caso do Bairro do Quitandinha, Petrópolis/RJ. In: XVII SRHNe - Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. João Pessoa – PB.
- Pachepsky, Y. A., Rawls, W. J., & Lin, H. S. (2006). Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma*, 131(3-4), 308-316.
- Schaap, M. G., Leij, F. J., & van Genuchten, M. Th. (2001). Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3-4), 163–176. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8).
- Silva Júnior, J. J., Sousa, M. B. (2019) Determinação de parâmetros da curva de retenção de água no solo em campo por meio do Software Hydrus 1-D. *Tópicos em Ciências Agrárias* Volume 3, 12.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., & van Genuchten, M. Th. (2008). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 4.08, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA.
- Van Genuchten, M. T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc.* 44: 892–898 p.
- Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I. (2024) Dados Meteorológicos Diários Brasileiros (BR-DWGD). Disponível em: <https://sites.google.com/site/alexandrecandidoxavierufes/brazilian-daily-weather-gridded-data?authuser=0>. Acesso em: 01 jul. 2024