

MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À PREVISÃO DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS: Exemplos em Áreas Naturais e de Risco

MATHEMATICAL MODELS APPLIED TO THE FORECAST OF SHALLOW TRANSLATIONAL LANDSLIDES: Examples from Natural and Risk-Prone Areas

Fabrizio de Luiz Rosito Listo¹
fabrizio.listo@ufpe.br

ABSTRACT

One of the methods used to predict shallow translational landslides susceptible areas are the mathematical models on physical bases that physically describe the processes by means of mathematical equations. Thus, the objective of this work is to present the theoretical basis, methodological procedures, main limitations and two applications of the most commonly used mathematical models, SHALSTAB and TRIGRS. Both models are based on physical equations, although they present some differences in their mathematical structures, whence the accuracy of the input parameters are fundamental to ensure better prediction results. While the models have many advantages, such as the non-incorporation of past events in their analysis, as in other methods (for example statistics) and the reduction of subjectivity (as in heuristic analyzes), its application is still poorly observed by public agencies for urban planning purposes, despite the requirement susceptibility maps for occupation of urban and rural land use in accordance with Brazilian Federal Law.

Keywords: Shallow translational landslides; SHALSTAB; TRIGRS.

¹ Departamento de Ciências Geográficas, UFPE.

RESUMO

Um dos métodos utilizados para a previsão de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais rasos são os modelos matemáticos em bases físicas, que descrevem fisicamente os processos por meio de equações matemáticas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é apresentar o embasamento teórico, os procedimentos metodológicos, as principais limitações e duas aplicações dos modelos matemáticos mais utilizados internacionalmente, SHALSTAB e TRIGRS. Ambos os modelos baseiam-se em equações físicas, embora apresentem algumas diferenças em suas estruturas matemáticas, nos quais a acurácia dos parâmetros de entrada são fundamentais para garantirem melhores resultados de previsão. Apesar de possuírem muitas vantagens, tais como a não incorporação de eventos pretéritos em sua análise, como em outros métodos (ex. estatísticos) e a redução da subjetividade (como em análises heurísticas), sua aplicação é ainda pouco observada por órgãos públicos para fins de planejamento urbano, apesar da exigência de cartas de suscetibilidade para ocupação de terrenos urbanos e rurais de acordo com a Legislação Federal atual do país.

Palavras-chaves: Escorregamentos translacionais rasos; SHALSTAB; TRIGRS.

CONTEXTO

Em função da ocorrência recorrente de desastres naturais no país, sobretudo durante intensos episódios pluviométricos, com elevadas perdas econômicas, sociais e vítimas, instaurou-se desde 2012 no Brasil, a Lei Federal n. 12.608 (BRASIL, 2012), que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. Dentre outras atribuições, esta nova legislação tornou dever da União, dos estados e dos municípios adotar medidas necessárias para redução dos riscos causados por desastres naturais, principalmente, em áreas topograficamente declivosas. Adicionalmente, incentiva medidas de previsão e de mitigação para conter desastres naturais e situações de risco, principalmente em áreas suscetíveis a movimentos de massa e ainda não ocupadas. Nesse contexto, o uso de modelos

matemáticos para a previsão de áreas instáveis, sobretudo a escorregamentos translacionais rasos, que são comuns no Brasil, pode ser uma ferramenta extremamente objetiva, simples e de baixo custo no auxílio à redução das situações negativas geradas por estes processos.

Estes modelos possuem como base os modelos de estabilidade e os modelos hidrológicos, considerando informações geotécnicas e hidrológicas das encostas. Busca, com base em leis físicas, diminuir a subjetividade na análise de rupturas, quantificando os graus de suscetibilidade em valores absolutos, por meio do cálculo do Fator de Segurança (FS) (MORGENSTER e SANGREY, 1978; SELBY, 1993; TERLIEN et al., 1995; GUZZETTI et al., 1999; VAN WESTEN, 2004; entre outros).

Dos modelos matemáticos para a previsão de graus de suscetibilidade das encostas, destacam-se os modelos SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability*) (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994); SINMAP (*Stability Index Mapping*) (PACK et al., 1998) e TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional*) (IVERSON, 2000 e BAUM et al., 2002). O modelo SHALSTAB já foi aplicado com sucesso em diferentes regiões, como por exemplo, na costa oeste dos Estados Unidos (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994; DIETRICH et al., 1995; CASADEI et al., 2003), na Argentina (RAFAELLI et al., 2001), na Itália (SANTINI et al., 2009; CERVI et al., 2010) e na Nova Zelândia (CLAESSENS et al., 2005), apresentando resultados com excelente precisão. Nas paisagens tropicais úmidas brasileiras, também foi utilizado com sucesso por Ramos et al.

(2002); Guimarães et al. (2003); Fernandes et al. (2004); Redivo et al. (2004); Gomes (2006); Zaidan e Fernandes (2009), Vieira et al. (2010); Listo e Vieira (2012), Michel et al. (2014), entre outros.

Em menor escala, o modelo SINMAP foi utilizado por Pack et al. (1998) na bacia de *Rose Creek* em Mission (*British Columbia*, Canadá), atingida por uma série de escorregamentos em extensas áreas íngremes. Os autores obtiveram um alto percentual de acerto, pois aproximadamente 60% dos escorregamentos mapeados coincidiram em áreas previstas como instáveis pelo modelo. Na Serra do Mar Paulista, o modelo SINMAP foi aplicado por Lopes (2006) em três áreas pilotos na região de Cubatão, obtendo-se mais de 85% de acerto de áreas instáveis e por Nery e Vieira (2014), na Bacia da Ultrafértil em Cubatão, que também obtiveram sucesso, ao encontrar índices acima de 70% de cicatrizes de escorregamentos em áreas instáveis.

O modelo TRIGRS, diferentemente dos demais pela sua característica transiente, calcula a estabilidade a escorregamentos translacionais rasos em diferentes espessuras do solo conforme o avanço da infiltração decorrente da intensidade e da duração da chuva ao longo do tempo (IVERSON, 2000; BAUM et al., 2002). Este modelo já foi aplicado por Godt et al. (2006) na região de Seattle (EUA), frequentemente afetada por escorregamentos translacionais rasos com perdas humanas e materiais. Baum et al. (2005) estudaram a mesma área, e após a comparação dos resultados obtidos por diferentes modelos, também identificaram resultados mais satisfatórios na previsão de escorregamentos realizada pelo

TRIGRS. Na comparação entre diferentes modelos, Frattini et al. (2004) aplicaram os modelos SHALSTAB e TRIGRS em uma bacia na província de Lecco (Itália), que foi atingida por cerca de 150 escorregamentos em maio de 1998. Do total dos escorregamentos, os autores verificaram que o modelo apresentou os melhores resultados em relação ao SHALSTAB, uma vez que concentrou cerca de 70% do total de cicatrizes, enquanto o SHALSTAB, 60%. Dessa forma, este trabalho objetiva demonstrar aplicações do modelo matemático SHALSTAB em uma área densamente urbanizada no município de São Paulo e do modelo TRIGRS na Serra do Mar Paulista, frequentemente atingida por escorregamentos translacionais rasos.

MODELOS MATEMÁTICOS EM BASES FÍSICAS

Conforme Christofolletti (1999), modelos podem ser compreendidos como qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real. O uso de modelos sempre foi muito difundido na área das Geociências, tornando-se mais explícito a partir da década de 1960 com o lançamento das obras *An Introduction to Statistical Models in Geology* (KRUMBEIN e GRAYBILL, 1965) e a coletânea de ensaios *Models in Geography* (CHORLEY, 1975). Ambas as obras foram mencionadas por Christofolletti (1999), traduzidas para o português e ganharam um grande avanço por meio da teoria probabilística e da adoção de modelos matemáticos na década de 1970, reforçados pela introdução da informática a partir da década de 1980, sendo nos dias atuais, uma das mais importantes linhas de pesquisa geomorfológica no Brasil e em outros países, como Itália e EUA (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Dentre os diferentes tipos de modelos, os modelos matemáticos são abstrações que substituem objetos, forças, eventos, entre outros, por expressões matemáticas que contêm variáveis, parâmetros e constantes matemáticas (KRUMBEIN e GRAYBILL, 1965; CHORLEY, 1975). Nesse sentido, os modelos matemáticos possuem como base os modelos de estabilidade, que levam em consideração informações detalhadas das encostas e são baseados nos princípios da mecânica dos solos. Este método busca diminuir a subjetividade na análise de rupturas, quantificando os graus de suscetibilidade em valores absolutos, por meio do cálculo do Fator de Segurança (TERLIEN et al., 1995, entre outros). O Fator de Segurança (FS) representa a razão entre a resistência e a tensão de cisalhamento, sendo que este valor sempre terá que ser igual ou maior que um para que haja estabilidade (MORGENSTERN e SANGREY, 1978, entre outros). Nesse sentido, o uso de modelos na Geomorfologia tem sido crescente, pois simulam possíveis cenários de estabilidade, que podem auxiliar na tomada de decisões.

O **modelo SHALSTAB** surgiu a partir de trabalhos de DIETRICH et al. (1993), MONTGOMERY e DIETRICH (1994) e DIETRICH e MONTGOMERY (1998). Calcula a suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos, em escala de bacia hidrográfica, a partir da compilação de um modelo de estabilidade baseado na Equação do Talude Infinito (teoria do Fator de Segurança – FS) e de um modelo hidrológico (*steady-state*), considerando fluxos subsuperficiais constantes, conforme os trabalhos realizados por BEVEN e KIRKBY (1979) e O'LOUGHLIN (1986).

Na combinação entre os modelos de estabilidade e hidrológico, são incorporados respectivamente os parâmetros topográficos (ângulo da encosta e área de contribuição), obtidos a partir de um Modelo Digital do Terreno, e as propriedades físicas do solo (coesão, ângulo de atrito interno, espessura do solo e peso específico) (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994). Dessa forma, o modelo baseia-se na premissa de que os solos, na presença de água, possuem uma baixa coesão e ângulo de atrito e associado às características topográficas da área de estudo, calcula o equilíbrio de forças do sistema. Suas limitações estão relacionadas à aplicação do modelo em áreas de solo espesso, áreas com baixa declividade, afloramentos de rochas e áreas muito escarpadas. Em função destes fatores, sua aplicação é restrita à avaliação da suscetibilidade a escorregamentos somente do tipo translacionais rasos onde esteja bem definido um plano de transição, como a transição solo/rocha (GUIMARÃES, 2000).

A combinação destes modelos, resolvida pela rotina automatizada do SHALSTAB, é demonstrada na Equação 1, que contempla todas as variáveis do modelo, e que também pode ser escrita sem considerar a variável coesão do solo (C'), conforme a Equação 2. Em razão da dificuldade de se determinar a transmissividade do solo (produto entre a condutividade hidráulica saturada e a espessura do solo), MONTGOMERY e DIETRICH (1994) fizeram uma classificação para os valores de $\text{Log}(Q/T)$, demonstrada na Equação 3, permitindo a hierarquização da área em termos de suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos, indicando que, quanto maior for o valor absoluto da razão

(Q/T) , na qual Q equivale à chuva em estado crítico ($m\ dia^{-1}$) e T à transmissividade do solo saturado ($m^2\ dia^{-1}$), maior será a instabilidade do local (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994).

O mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo apresenta sete classes de estabilidade (Tab. 1) que seguem a condição apresentada pela igualdade entre a razão da área de contribuição pela unidade de contorno (a/b) e a razão hidrológica (Q/T) em que o logaritmo é aplicado em função dos baixos valores obtidos nessa razão (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994).

$$Q = \frac{T}{(a/b)} \operatorname{sen}\theta \frac{C'}{\rho_w g z \cos^2\theta \tan\phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \quad \text{Equação (1)}$$

$$Q = \frac{T}{(a/b)} \operatorname{sen}\theta \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \quad \text{Equação (2)}$$

$$\operatorname{Log} (Q/T) = \frac{\operatorname{sen}\theta}{\left(\frac{a}{b}\right)} \left[\frac{C'}{\rho_w g z \cos^2\theta \tan\phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \right] \quad \text{Equação (3)}$$

Onde: Q é a chuva em estado crítico necessária para a ruptura ($m\ dia^{-1}$); T é a transmissividade do solo saturado ($m^2\ dia^{-1}$), θ é o ângulo da encosta ($^\circ$); a é a área de contribuição ou área drenada a montante (m^2); b é o comprimento de contorno unitário (resolução do grid dada em m); C' é a coesão efetiva do solo (kPa); ρ_w é a densidade da água (kg/m^3); g é a aceleração da gravidade (m/s^2); z é a espessura do solo (m); ϕ é o ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$) e ρ_s é a densidade (massa específica) do solo saturado (Kg/m^3).

Classes originais do modelo log (Q/T)	Classes de Estabilidade	Significado*
Estável	Incondicionalmente estável e saturado	Áreas mais estáveis
>-2.2	Incondicionalmente estável e não saturado	
-2.5 - - 2.2	Estável e não saturado	Áreas de média instabilidade
-2.8 - - 2.5	Instável e não saturado	
-3.1 - - 2.8	Instável e saturado	
<-3.1	Incondicionalmente instável e não saturado	Áreas mais instáveis
Incondicionalmente Instável	Incondicionalmente instável e saturado	

Tabela 1. Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB.

*Trata-se de uma releitura realizada a partir do arcabouço teórico conceitual do modelo com um possível agrupamento de classes de suscetibilidade para simplificação da interpretação do mapa gerado pelo modelo. Fonte: Modificado de DIETRICH e MONTGOMERY (1998).

O modelo TRIGRS foi desenvolvido para a geração de mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos induzidos por eventos pluviométricos. Foi desenvolvido por Baum et al. (2002) para calcular a variação do Fator de Segurança (FS), em diferentes profundidades (z), conforme mudanças da carga de pressão (ψ) ao longo de um evento pluviométrico. O modelo funciona a partir da associação entre um modelo hidrológico, que se baseia na equação de infiltração de Richards² (Equação 4) de acordo com a Lei de Darcy e conforme o sistema de coordenadas apresentado na Fig. 1, e outro de estabilidade (Equação 5), proposta por Iverson (2000), por meio de uma rotina em Linguagem Fortran. Este modelo supõe a existência de duas frentes de infiltração: uma permanente, que ocorre normalmente quando o solo está quase saturado (por meio de fluxo lateral, paralelo à direção da encosta), e outro transiente, normal à superfície.

¹ Equação de fluxo tipo transiente e tridimensional para meio heterogêneo, isotrópico e não saturado.

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_L(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \sin \alpha \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_L(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right]$$

Equação (4)

Onde:

ψ = carga de pressão [kPa]

θ = umidade [adimensional]

K_L e K_z = condutividade hidráulica lateral e normal, respectivamente, a encosta referida ao plano x-y-z, onde x é paralelo à encosta, y paralelo às curvas de nível locais e z normal ao plano x-y [m/skPa]

z = variável espacial [m]

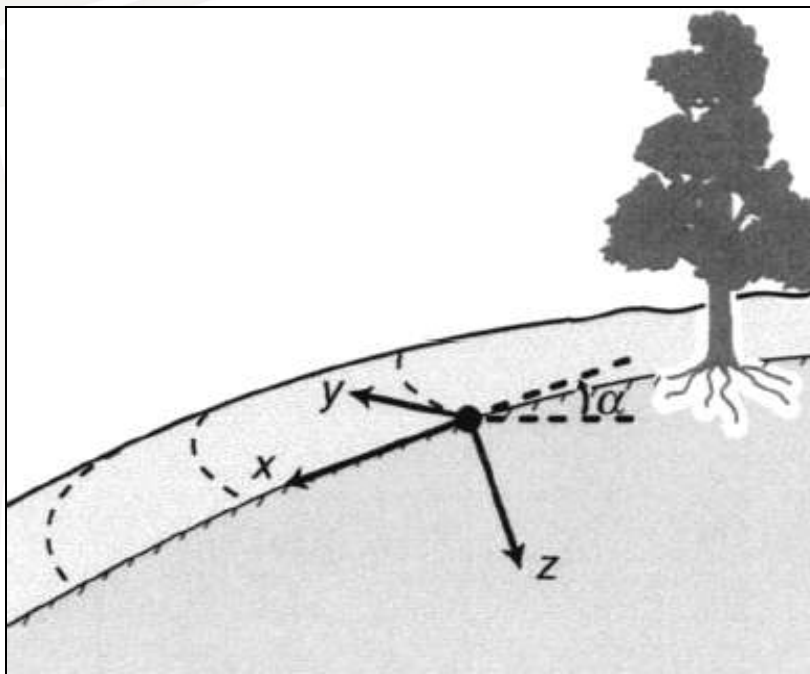


Figura 1: Modelo de infiltração do TRIGRS de acordo com o sistema de coordenadas cartesianas usada na análise de RICHARDS, sendo x e y tangentes à superfície da encosta e às curvas de nível, respectivamente. Z representa a normal ao plano x,y e α é o ângulo da encosta. Fonte: IVERSON (2000).

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} + \frac{c' - \psi(Z,t)\rho_w \tan \phi}{\rho_s Z \sin \theta \cos \theta} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

ϕ = ângulo de atrito interno [°]

θ = ângulo da encosta [°]

c' = coesão efetiva (c) [kPa]

ψ = carga de pressão [kPa]

Z = profundidade do solo [m]

t = tempo [s]

ρ_w = densidade da água [kg/m³]

ρ_s = densidade do solo [kg/m³]

A entrada dos dados no TRIGRS é feita, inicialmente, por meio de um Modelo Digital do Terreno (MDT), de onde são retiradas as informações de declividade (ângulo da encosta) e de área de contribuição (direção de fluxo). Posteriormente, são necessários os valores das propriedades geotécnicas e hidrológicas do solo (coesão do solo (c); densidade do solo (ρ_s); espessura máxima (Z_{max}); ângulo de atrito interno (ϕ); altura inicial do lençol freático (d); taxa de infiltração inicial (I_{LT}); difusividade hidráulica (D_0) e condutividade hidráulica saturada vertical (K_s)). Em seguida, é necessária a introdução de valores das propriedades pluviométricas da área, tais como, o tempo inicial de um evento pluviométrico; a intensidade da chuva para cada evento e a duração acumulada de chuva no final de cada evento, que podem influenciar a variação do FS. São também necessárias informações adicionais que controlam o modelo como, por exemplo, o número de intervalos (nzs) ao longo de uma espessura de solo (Z_{max}) em que são calculados os valores de carga de pressão (ψ) e do Fator de Segurança (FS).

Os valores gerados pelo MDT (declividade e direção de fluxo) são inseridos por meio de arquivos em formato *asc*. Os parâmetros geotécnicos e hidrológicos do

solo podem ser constantes para toda a área de estudo ou podem ser inseridos por meio de valores distribuídos obtidos por mapeamentos geoestatísticos. Para os valores pluviométricos, devem ser indicados o número de eventos, a intensidade da chuva, I_nZ , em mm/h, assim como a duração de cada evento, em segundos.

Conforme Baum et al. (2002) podem-se elencar algumas limitações do modelo, devido às simplificações realizadas em suas bases teóricas, cujas principais são: (a) o modelo assume fluxo homogêneo saturado ou perto da saturação e solo isotrópico, não podendo, portanto, ser aplicado em áreas com condições iniciais muito secas e anisotrópicas ou heterogêneas; (b) os resultados finais são sensíveis às condições iniciais, principalmente, profundidade do lençol freático e taxa de infiltração; (c) é desconsiderado o papel da evapotranspiração, devido à sua baixa taxa durante eventos pluviométricos intensos; (d) a variação da carga de pressão ocorre apenas em função da profundidade e do tempo e, por último, (e) o modelo de estabilidade assume como uniforme a profundidade e as propriedades físicas do solo, sendo aplicado somente para previsão de movimentos de massa do tipo escorregamento translacional raso induzidos por eventos de precipitação. Destaca-se também, como limitação, que o modelo desconsidera características geológicas do terreno (ex. xistosidades, fraturas, juntas, falhas, entre outros).

APLICAÇÕES DOS MODELOS SHASLTAB E TRIGRS

Listo (2011) aplicou o modelo SHALSTAB em uma bacia densamente ocupada do rio Aricanduva, uma das principais drenagens do Rio Tietê em São Paulo (Fig. 2). O modelo foi validado a partir de uma carta de risco realizada em campo no

qual o risco foi classificado em quatro graus (R1, R2, R3 e R4, ou seja, baixo, médio, alto e muito alto) com base em indicadores naturais e antrópicos.

O mapeamento de risco envolveu cerca de 2.000 moradias e a delimitação de 16 setores, na qual foram avaliados (i) indicadores naturais (ex. vegetação, tipo de solo e relevo); (ii) indicadores antrópicos (ex. número de moradias, tipologia das construções e distância das moradias em relação à encosta) e (iii) evidências de instabilização (ex. cicatrizes de escorregamentos, trincas na moradia e no terreno, árvores, postes e muros inclinados, entre outros). Destes 16 setores, seis foram mapeados com o grau de risco mais elevado (R4) onde havia aproximadamente 600 moradias caracterizadas por ocupações precárias desprovidas de infraestrutura em terrenos muito instáveis.

103

Os resultados foram bastante eficientes, pois dos 16 setores de risco mapeados, 12 foram “concordantes” com o mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo. Por exemplo, em um dos setores mapeados como R2 (risco médio), cerca de 50% da área foi considerada estável pelo modelo. Em outro caso de concordância, um dos setores avaliado como R4 (risco alto) apresentou cerca de 40% de sua área classificada como instável, 50% como de média instabilidade e apenas 10% como estável.

Dentre os setores concordantes, especialmente os que apresentaram risco alto (R3) e muito alto (R4), ocorreram escorregamentos de grande magnitude deflagrados por chuvas de 103 mm em 24h em janeiro de 2010. Dessa forma, a suscetibilidade

natural apontada pelo SHASLTAB, à ocupação inadequada e o evento pluviométrico deflagraram escorregamentos com elevadas perdas sociais e econômicas, indicado que a classificação feita em campo, assim como a previsão do modelo foi correta.

Dos setores discordantes, destacam-se dois classificados com grau de risco baixo (R1), porém com maioria de suas áreas classificadas como instável pelo SHASLTAB. Entretanto, apesar destes setores apresentarem uma alta suscetibilidade natural para à ocorrência de escorregamentos, foram classificados com grau baixo de risco, pois apresentaram infraestrutura adequada e coerente ao tipo de terreno, demonstrando que mesmo áreas com alta suscetibilidade podem ser ocupadas, desde que haja infraestrutura adequada, sendo este tipo de resultado importante para o planejamento de bacias hidrográficas urbanas e densamente ocupadas. Já o modelo TRIGRS foi aplicado por Listo (2015) em uma bacia hidrográfica da Serra do Mar Paulista. A Serra do Mar é certamente um dos relevos mais importantes do Brasil, tanto em termos geomorfológicos, em função de sua gênese e evolução, quanto por interligar os maiores portos de importação e exportação das Regiões Sul e Sudeste. Entretanto, é frequentemente afetada por escorregamentos rasos, destacando-se os eventos históricos ocorridos nos municípios de Caraguatatuba (SP) em 1967; Cubatão (SP) em 1985; Ilhota, Gaspar e Luís Alves (SC) em 2008; Angra dos Reis (RJ) em 2010 e, mais recentemente, nas Regiões Serranas do Rio de Janeiro e do Paraná em 2011, causando diversas perdas econômicas e sociais.

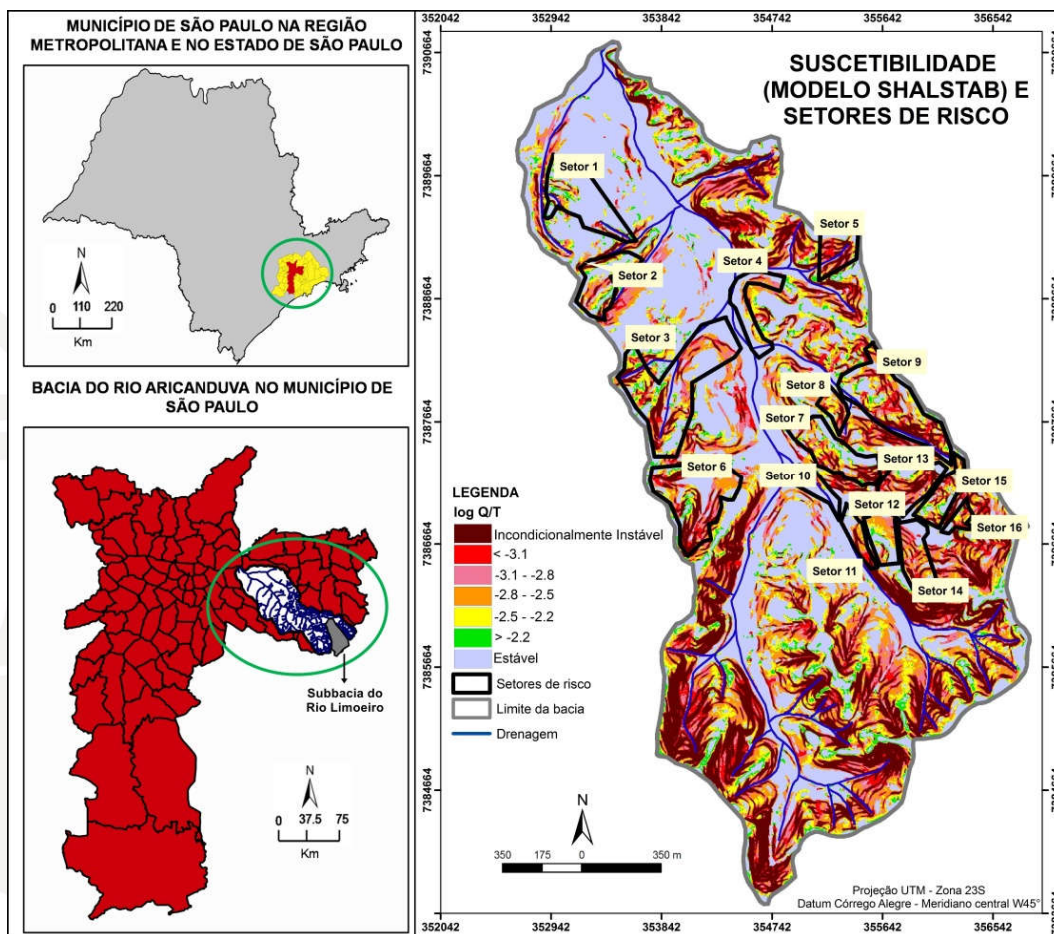


Figura 2: Mapa de Suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB na bacia do rio Limoeiro, município de São Paulo ($C'=0$ kPa; $\Phi=35^\circ$; $z=2$ m; $\rho_s=1700$ Kg/m³).

Em função disto, o exemplo desta proposta objetivou avaliar a estabilidade das encostas em uma das bacias mais afetadas pelos escorregamentos de março de 1967 (Bacia do rio Guaxinduba) no município de Caraguatatuba (SP), com cerca de 440 vítimas, bem como, avaliar se o uso de dados geotécnicos e hidrológicos coletados *in situ* pôde fornecer resultados mais reais de suscetibilidade aos

escorregamentos rasos. Assim, foram gerados dois grupos de cenários (A e B) no TRIGRS utilizando-se os mesmos parâmetros topográficos e pluviométricos com variação de alguns parâmetros geotécnicos e hidrológicos. Os parâmetros topográficos foram obtidos por meio de um Modelo Digital do Terreno de alta resolução elaborado a partir da tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) baseado em nuvens de pontos coletados.

Os parâmetros pluviométricos foram extraídos de três postos pluviométricos do Sistema SIGRH/DAEE (*Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo/Departamento de Águas e Energia Elétrica*), considerando a consistência dos dados; a localização geográfica do posto em relação à bacia do Guaxinduba e as séries temporais relativas aos escorregamentos de março de 1967.

Dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos, no cenário A foram utilizados valores secundários selecionados no melhor mapa de suscetibilidade gerado por Vieira et al. (2010) em uma área próxima de Caraguatatuba baseados na coleta *in situ* realizada por Wolle e Carvalho (1989) em duas áreas na Serra do Mar, que identificaram dois tipos de horizontes do solo acima da rocha migmatítica intensamente fraturada.

Para o cenário B, os valores de coesão, de densidade do solo e de ângulo de atrito foram coletados *in situ* por Ferreira (2013) e os valores de condutividade hidráulica foram coletados também *in situ* por Gomes (2012) em três cicatrizes na

bacia do Guaxinduba denominadas C1; C2 e C3 em três perfis. Nestas pesquisas, a coesão e o ângulo de atrito interno foram obtidos a partir de um ensaio de resistência ao cisalhamento direto inundado com seis blocos indeformados coletados e a condutividade hidráulica foi mensurada por meio de um Permeâmetro de Guelph. Por fim, para a averiguação da acurácia do modelo, os cenários foram validados por meio da sobreposição (análise de concordância) com um mapa de cicatrizes dos escorregamentos de 1967 de Vieira e Ramos (2015), no qual, os autores mapearam 188 cicatrizes a partir da interpretação de imagens aéreas ortorretificadas.

Dos principais resultados verificados, o cenário A apresentou um percentual total de 72% das classes instáveis do TRIGRS localizadas em encostas retilíneas e declivosas com ângulos acima de 30° e 40° e elevadas áreas de contribuição (Fig. 3). Na sobreposição do mapa de cicatrizes com o mapa de suscetibilidade, 67% das áreas mais instáveis coincidiram com as cicatrizes neste cenário, confirmando a eficiência do modelo (Fig. 3).

No cenário B houve uma redução de quase 50% da classe de maior instabilidade em relação ao cenário anterior. A classe seguinte do modelo, também de instabilidade, apresentou um percentual alto em torno de 40% (Fig. 3). Mesmo assim, as classes de instabilidade ainda equivalem a 71% da área total da bacia (Fig. 3), isto é, com um comportamento muito semelhante ao cenário anterior; embora geotecnicamente, a classe com percentual de 40% deste cenário apresente uma instabilidade um pouco menor por estar próxima do limite de Fator de Segurança = 1.

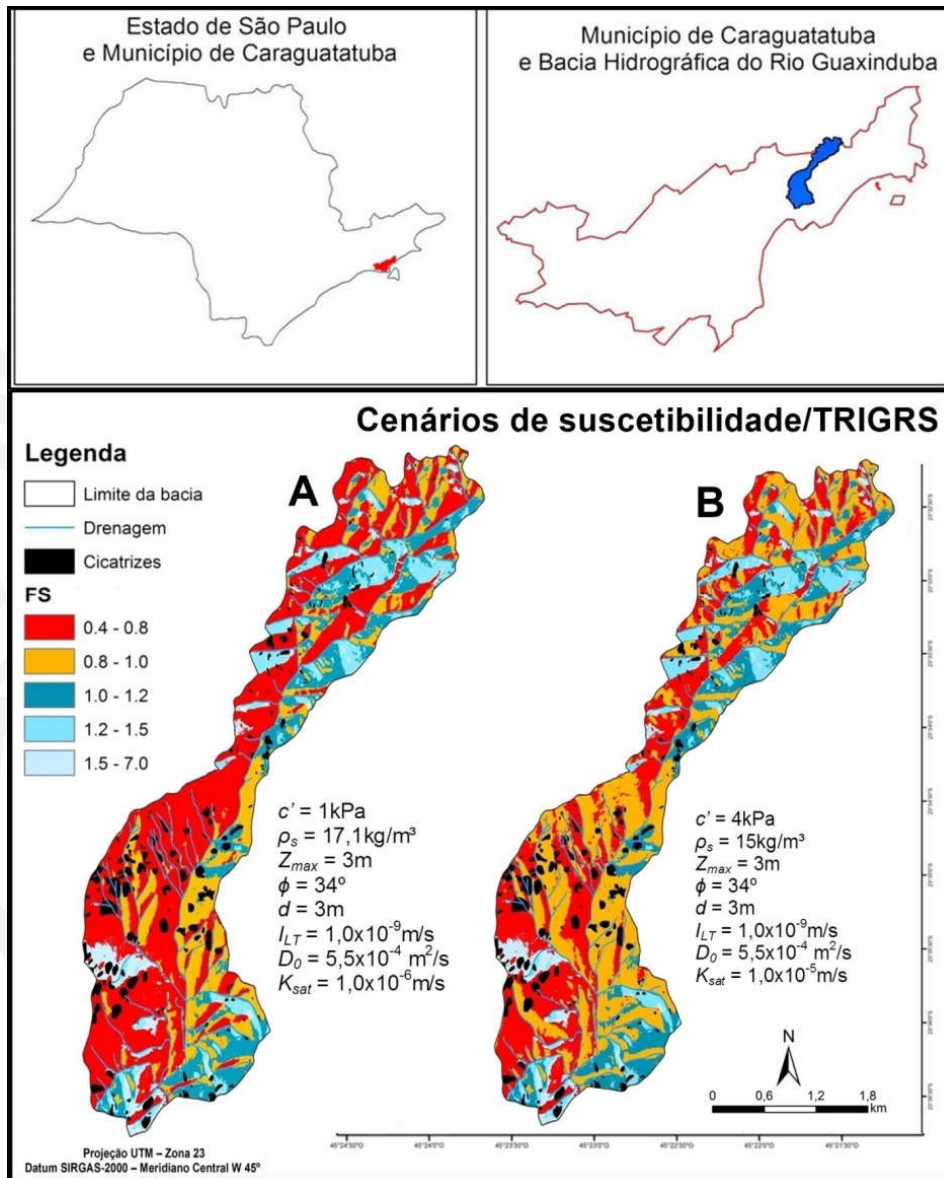


Figura 3: Mapas de suscetibilidade gerados pelo modelo TRIGRS (cenários A e B).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ambos os modelos baseiam-se em equações físicas e a grande vantagem em relação aos demais métodos é a não incorporação de eventos pretéritos em sua análise, como em outros métodos (ex. estatísticos). Nesse sentido, o modelo TRIGRS, mostrou-se mais complexo, por necessitar de um número maior de parâmetros.

Os modelos podem ser baixados gratuitamente: TRIGRS (USGS)³ e SHASLTAB (Grupo de Estudo de Geomorfologia da Universidade de *Berkeley*)⁴.

Ambos apresentam algumas diferenças em suas estruturas matemáticas, sobretudo em relação ao modelo hidrológico, à variável tempo e aos parâmetros pluviométricos (TRIGRS).

A acurácia dos parâmetros de entrada (topográficos, geotécnicos e pluviométricos) é fundamental para garantir melhores resultados aos modelos.

Ressalta-se a importância da identificação de superfícies de ruptura: podem ajudar em monitoramentos hidrológicos e geotécnicos em tempo real (auxílio na localização mais precisa de instrumentos, ex. sensores de umidade).

Apesar da legislação atual (LEI 12.608/2012) ainda não se observa a utilização de modelos matemáticos por órgãos públicos para fins de planejamento urbano.

³ <http://landslides.usgs.gov/research/software.php#trigrs>

⁴ <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAUM, R. L.; COE, J. A.; GODT, J. W.; HARP, E. L.; REID, M. E.; SAVAGE, W. Z.; SHULZ, W. H.; BRIEN, D. L.; CHLEBORAD, A. F.; MACKENNA, J. P.; MICHEL, J. A. (2005). Regional Landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. *Landslides* 2: 266-279.

BAUM; R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. (2002). TRIGRS: A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis. USGS.Colorado. 35 p.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Bulletin of Hydrological Sciences*, v.24, n.1. p. 43-69.

BRASIL (2012). LEI Nº 12.608, DE 10 DE ABRIL DE 2012.

CASADEI, M., DIETRICH, W.E., MILLER, N.L. (2003). Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms* (28), pp. 925-950.

CERVI, F., BERTI, M., BORGATTI, L., RONCHETTI, F., MANENTI, F., CORSINI, A. (2010). Comparing predictive capability of statistical and deterministic methods for landslide susceptibility mapping: a case study in the northern Apennines (Reggio Emilia Province, Italy). *Landslides*, Online First. doi: 10.1007/s10346-010-0207-y.

CHORLEY, R. J. (1975). Modelos em geomorfologia. In CHORLEY, R. J.; HAGGET, P. Modelos físicos e de informação em Geografia. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Edusp, 60 p.

CHRISTOFOLETTI, A. (1999). Modelagem de Sistemas Ambientais. Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, p. 3-42.

CLAESSENS, L., HEUVELINK, G.B.M., SCHOORL, J.M., VELDKAMP, A. (2005). DEM resolutions effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modeling. *Earth Surface Processes and Landforms* (30). p. 461-477.

DIETRICH, W. E. e MONTGOMERY, D. R. (1998). SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement). 29 p.

DIETRICH, W. E., REISS, R.; HSU, M. L.; MONTGOMERY, D.R. (1995). A Process-Base Model for Colluvium Soil Depth and Shallow Landsliding Using Digital Elevation Data. *Hydrol. Process.*, 9: 383-400.

DIETRICH, W.E., WILSON, C.J., MONTGOMERY, D.R., MCKEAN, J. (1993). Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a digital terrain model. *Journal of Geology* (101), 259-278.

FERNANDES, N. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H (2004). Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. *CATENA*, v.55, n.2. p. 163-181.

FERREIRA, S. F (2013). Análise da influência das propriedades físicas do solo na deflagração dos escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP). Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. USP, São Paulo, 112 p.

FRATTINI, P.; CROSTA, G. B.; FUSI, N.; NEGRO, P.D. (2004). Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modelling approach for hazard assessment. *Engineering Geology* 73: 277-295.

GODT, J. W.; BAUM, R. L; CHLEBORAD, A. F. (2006). Rainfall Characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, EUA. *Earth Surface Process Landforms* 31: 97-110.

GOMES, M. C. V (2012). Análise da influência da condutividade hidráulica saturada dos solos nos escorregamentos rasos na bacia do rio Guaxinduba (SP). Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. USP, São Paulo, 138 p.

GOMES, R.A.T. (2006). Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 102 p.

GUIMARÃES, R.F., MONTGOMERY, D. R., GREENBERG, H. M., FERNANDES, N.F., GOMES, R. A.T., CARVALHO JÚNIOR, O.A. (2003). Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology* (69). p. 99-108.

GUZZETI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. (1999). Landslides hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* (31). p. 181-216.

INVERSON, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research* (36). p. 1897-1910.

KRUMBEIN, W.C.; GRAYBILL, F.A. (1965). *An Introduction to Statistical Models in Geology*. New York, 475p.

LISTO, F. L. R. (2011). *Análise da suscetibilidade e do grau de risco a escorregamentos rasos na bacia do Alto Aricanduva, RMSP (SP)*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.8.2011.tde-24042011-182718. Recuperado em 2017-01-15, de www.teses.usp.br

LISTO, F. L. R. (2015). *Propriedades geotécnicas dos solos e modelagem matemática de previsão a escorregamentos translacionais rasos*. Tese de Doutorado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. Recuperado em 2017-01-15, de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-08032016-152717/>

LISTO, F.L.R.; VIEIRA, B. C. (2012). Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. *Geomorphology*. Volumes 169–170, 1 October 2012, Pages 30–44.

MICHEL, G.P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F (2014). Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, v.14, p. 1266-1277.

MONTGOMERY, D.R. e DIETRICH, W.E. (1994). A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* (30). p. 1153-1171.

MORGENSTERN, N. R. e SANGREY, D. A. (1978). *Methods of Stability Analysis*. In: SCHURTER, R.L. & KRIZEK, R.J. (Eds.). *Landslides: Analysis and Controls*. Washington, D.C. NAS-NRC. p. 155-171.

NERY, T. D.; VIEIRA, B. C (2014). Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (Print), v. 2, p.1-15.

O'LOUGHLIN, E. M. (1986). Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. *Water Resources Research*, v. 22, p.794-804.

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. (1998). SINMAP – a stability index approach to terrain stability hazard mapping. User's manual. Terratech Consulting Ltd. Salmon Arm, B. C. Canada. 68 p.

RAFAELLI, S.G., MONTGOMERY, D.R., GREENBERG, H.M. (2001). A comparison of thematic of erosional intensity to GIS-driven process models in an Andean drainage basin. *Journal of Hydrology* (244). p. 33-42.

RAMOS, V.M., GUIMARÃES, R.F., REDIVO, A.L., GOMES, R.A.T., FERNANDES, N.F., CARVALHO FILHO, O.A. (2002). Aplicação do modelo SHALSTAB em ambiente ArcView para o mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos rasos na região do Quadrilátero Ferrífero-MG. *Espaço e Geografia* (5), 49-57.

REDIVO, A.L., RAMOS, V.M., GUIMARÃES, R.F., JÚNIOR, O.A.D.C., GOMES, R.A.T. (2004). Determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos na BR 256 no município de Ouro Preto-MG. *Ciência e Natura* (26), 31-46.

SANTINI, M., GRIMALDI, S., NARDI, F., PETROSELLI, A., RULLI, M.C. (2009). Preprocessing algorithms and landslide modelling on remotely sensed DEMs. *Geomorphology* (113), pp. 110-125.

SELBY, M. J. (1993). *Hillslope: materials & processes*. New York. Publisher: Oxford University Press. USA. 2 editions. 480 p.

TERLIEN, M T. J.; ASCH, T. W. J.; VAN WESTEN, C. J. (1995). Deterministic modeling in GIS-Based landslide hazard assessment. In: CARRARA, A. & GUZZETTI, F. (Eds.): *Geographical information system in assessing hazards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. p. 57-78.

VAN WESTEN, C. J. (2004). Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent development in landslides: evaluation and stabilization. Taylor & Francis Group. Rio de Janeiro. p. 39-53.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; AUGUSTO FILHO, O. (2010). Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Natural Hazards and Earth System Sciences (Print)*, v. 10, p. 1829-2010, 2010.

VIEIRA, B.C.; RAMOS, H (2015). Aplicação do modelo SHALSTAB para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). *Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo*, v. 29, p. 172-185.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. (1989). Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil. *Solos e Rochas*: p.27-36.

ZAIDAN, R.T. e FERNANDES, N.F. (2009). Zoneamento de suscetibilidade a escorregamentos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do Córrego da Independência – Juiz de Fora (MG). *Revista Brasileira de Geomorfologia* (10), pp. 57-76.