

Confins

Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasilera de geografia

46 | 2020
Número 46

Susceptibilidade a escorregamentos rasos a partir de parâmetros morfométricos e dos modelos SHALSTAB e do Valor Informativo

Shallow Landslide susceptibility evaluation based on morphometric parameters, SHALSTAB and Informative Value Models

Évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain superficiels à partir de paramètres morphométriques et des modèles SHALSTAB et de la Valeur Informative

JOSÉ EDUARDO BONINI, CARLOS VALDIR DE MENESES BATEIRA, VIVIAN CRISTINA DIAS, TIAGO DAMAS MARTINS ET BIANCA CARVALHO VIEIRA
<https://doi.org/10.4000/confins.30323>

Résumés

Português English Français

Escorregamentos rasos são processos naturais recorrentes na região das escarpas da Serra do Mar, no sudeste do Brasil, que podem configurar riscos para a sociedade caso estas encostas sejam ocupadas. O objetivo deste artigo foi comparar o desempenho da análise de susceptibilidade a escorregamentos rasos utilizando parâmetros morfométricos e os modelos SHALSTAB e Valor Informativo. A área de estudo foi a bacia do rio Gurutuba, no município de Itaoca (São Paulo), selecionada devido à grande quantidade de escorregamentos rasos deflagrados após chuvas intensas em 2014. A comparação entre os modelos foi feita utilizando a taxa de sucesso e a matriz de contingência. O modelo do Valor Informativo apresentou melhor desempenho, classificando as áreas instáveis mais de acordo com o inventário de cicatrizes, enquanto o modelo SHALSTAB indicou como instáveis zonas sem ocorrência de cicatrizes. Estes resultados são relevantes para o planejamento da região, que não possui estudos deste tipo.

Shallow landslides are frequent natural processes in the Serra do Mar region, in southeast Brazil. The occupation of these areas leads to the creation of risk areas. The main objective was to compare the performance of the shallow landslide susceptibility analysis using morphometric parameters, SHALSTAB and Informative Value model. The study area was the Gurutuba river basin, in the municipality of Itaoca (São Paulo), selected due to massive quantities of shallow landslides triggered after an extreme rainfall event in 2014. The comparison between the models

was made using the success rate and a contingency matrix. The model that presented better performance was the Informative Value. The SHALSTAB model has indicated as unstable sections of terrains without scars. These results are relevant for the purposes of regional planning of the municipality and also because there is a lack of studies of this type for the area.

Les glissements superficiels sont des processus naturels récurrents dans la région escarpée de Serra do Mar, au sud-est du Brésil. Fréquemment, selon l'occupation humaine, devient un risque important pour les personnes, structures et fonctionnalités. L'objectif de cet article était de comparer les performances de l'analyse de susceptibilité aux glissements de terrain superficiels à l'aide de paramètres morphométriques et des modèles SHALSTAB et Valeur Informatif. La zone d'étude était le bassin versant de la rivière Gurutuba, dans la municipalité d'Itaoca (São Paulo), choisie en raison de la grande quantité de glissements de terrain superficiels après les fortes pluies de 2014. La comparaison entre les modèles a été effectuée à l'aide du taux de réussite et de la matrice de contingence. Le modèle de valeur informatif présentait de meilleures performances, en classifiant davantage les zones instables en fonction de l'inventaire des cicatrices, tandis que le modèle SHALSTAB indiquait de zones instables sans aucune preuve du processus. Ces résultats sont pertinents pour la planification de la région, qui ne dispose pas d'études de ce type.

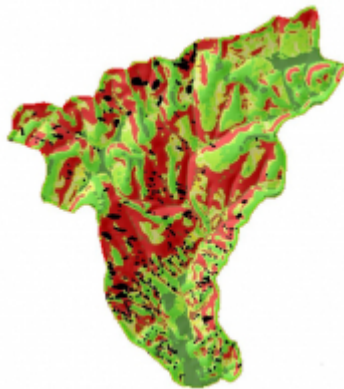
Entrées d'index

Index de mots-clés : Mouvements de masse; SHALSTAB; Valeur Informatif; Serra do Mar; Vallé du Ribeira.

Index by keywords: Mass movements; SHALSTAB; Information Value; Serra do Mar; Vale do Ribeira.

Índice de palavras-chaves: Movimentos de massa; SHALSTAB; Valor Informativo; Serra do Mar; Vale do Ribeira.

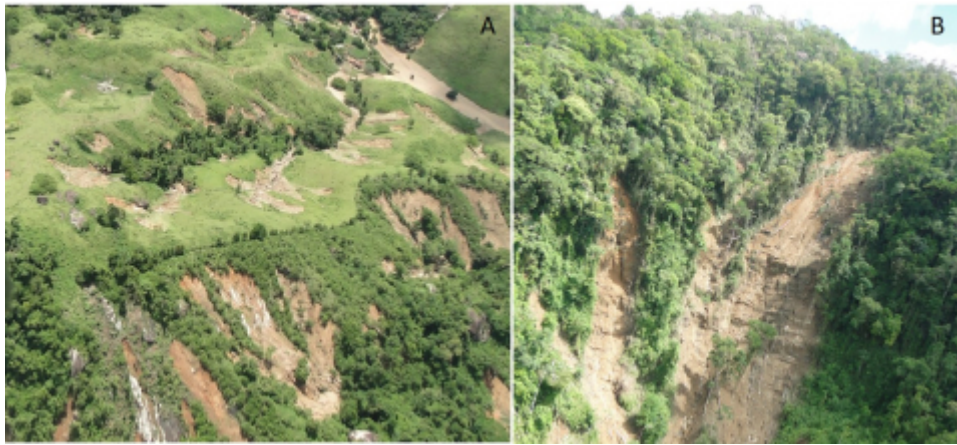
Texte intégral



Afficher l'image

- 1 Escorregamentos translacionais rasos são processos naturais que podem assumir grandes magnitudes, sendo definidos como movimentos de massa rápidos, condicionados por uma descontinuidade planar do substrato e regidos pela gravidade, cuja ocorrência, quase sempre, está associada a fortes precipitações capazes aumentar as pressões no solo, levando a perda da coesão entre as partículas e consequente ruptura da encosta ao longo da descontinuidade de resistência, usualmente no contato solo-rocha (Selby, 1993; Bierman e Montgomery, 2014).
- 2 A ocorrência desse tipo de movimento de massa pode estar associada a fatores morfométricos do relevo. São exemplos, as encostas com inclinações acentuadas até certo limite, de modo que exista material para ser mobilizado pelo processo, e as curvaturas côncavas, que concentram fluxos de subsuperfície e, portanto, necessitam de menores quantidades de precipitação para que o processo seja deflagrado (Selby, 1993; Montgomery e Dietrich, 1994).
- 3 Este processo é frequente na região da Serra do Mar no Brasil (Figura 1), devido à combinação de fatores condicionantes (ex. altos ângulos das encostas) e deflagradores com elevados totais pluviométricos (1750mm a 2000mm anuais). Muitas vezes os escorregamentos rasos ocorrem de maneira conjunta com corridas de detritos provendo o material necessário para desencadeá-las.

Figura 1 - Cicatrizes de escorregamentos rasos no município de Itaoca – Vale do Ribeira.



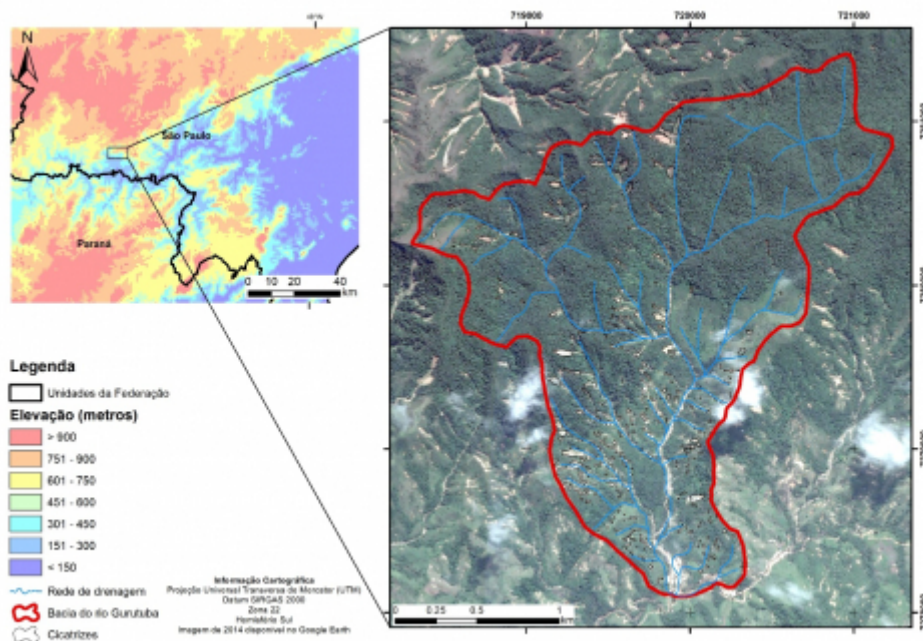
Fonte: Prefeitura Municipal de Itaoca.

- 4 Dada a magnitude dos escorregamentos rasos, é possível que estes venham configurar um perigo para populações e infraestruturas, tornando a sua previsão uma necessidade ao planejamento territorial. Podemos destacar, dentre as formas de previsão, os modelos matemáticos de bases físicas e os modelos estatísticos. No primeiro caso, os modelos descrevem fisicamente o processo por meio de equações matemáticas, como por exemplo o modelo *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB) (Montgomery e Dietrich, 1994;). Já no segundo caso, são estabelecidas correlações entre a ocorrência dos processos e fatores condicionantes julgados como relevantes (tais como ângulo e curvatura das encostas), estando os valores numéricos associados a uma probabilidade de ocorrência (Carrara *et al.*, 1991). Como exemplo deste método podemos citar o modelo do Valor Informativo desenvolvido por Yin e Yan (1988). Assim, o objetivo desta pesquisa foi realizar uma comparação do desempenho entre diferentes formas de avaliação de suscetibilidade a escorregamentos rasos: a análise pelos parâmetros morfométricos, o modelo SHALSTAB e o modelo do Valor Informativo.

Área de estudo

- 5 A área selecionada para este estudo foi a bacia do rio Gurutuba (4,56 km²) no município de Itaoca, Estado de São Paulo (Figura 2), devido à grande quantidade de escorregamentos rasos deflagrados durante um evento de precipitação pluvial intensa em 2014.

Figura 2 - Mapa de localização da bacia do rio Gurutuba no Estado de São Paulo e dos setores de maior ocorrência de escorregamentos.



- 6 A bacia do rio Gurutuba é composta de rochas graníticas com importante intemperismo ao longo das fraturas que, uma vez erodido, promove a presença de grande quantidade de blocos arredondados tanto nos perfis de alteração nas encostas quanto nas principais redes de drenagem. A bacia está situada próxima as Zonas de Cisalhamento Ribeira e Figueira, que exercem um controle estrutural nas encostas e na drenagem de toda a região (Mello e Bettencourt, 1998; Faleiros *et al.*, 2012).
- 7 Nos dias 13 e 14 de Janeiro de 2014, foram registrados 200mm de precipitação em apenas 2 horas (Gramani, 2015) e deflagrados 336 escorregamentos rasos concentrados sobretudo nos terços médio e inferior da bacia hidrográfica (Carou *et al.*, 2017). Além dos escorregamentos nas encostas, corridas de detritos foram geradas nos principais canais de drenagem com deposição predominante de blocos com mais de 2 m de diâmetro, sedimentos mais finos e matéria orgânica que alcançaram o centro do município, causando 25 mortes, destruição de moradias e plantações, e sérios danos à infraestrutura do município (Gramani, 2015 Brollo *et al.*, 2015).

Modelo Digital de Terreno e mapas morfométricos

- 8 Foi utilizado um Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução de 10m, gerado a partir das curvas de nível (equidistância de 10 metros) obtidas das cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC), em escala 1:10.000 (Folha Ribeirão das Pedras e Rio Palmital).
- 9 A partir do MDT, foram derivados mapas temáticos de elevação, ângulo das encostas, orientação das encostas, curvatura (planta/perfil) e área de contribuição. Os mapas foram obtidos por meio do *software ArcGIS*, exceto para o parâmetro áreas de contribuição, gerado por meio do *software SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses)* (Conrad *et al.*, 2015), com o algoritmo MFD (*Multiple Flow Direction*).
- 10 Foram calculados índices de Frequência (F) e de Concentração de Cicatrizes (CC), que consistem, respectivamente, na razão entre o número de células de cada classe e o total de células da bacia, e na divisão entre o número de células de cada classe no interior do perímetro da cicatriz e o total de células com área deslizada. O inventário de cicatrizes utilizado em todas as etapas foi elaborado por Carou *et al.* (2017) por interpretação de imagens Google Earth Pro de 10/08/2014 e validações em campo. Do total de 336 cicatrizes mapeadas pelos autores, a maioria possui áreas entre 50 e

300m², forma arredondada e localização nos terços baixo e médio da bacia hidrográfica.

Suscetibilidade a partir do modelo SHALSTAB

11 O SHALSTAB é composto por dois modelos, sendo um de estabilidade baseado na equação de Mohr-Coulumb e outro hidrológico que utiliza índices de chuva constantes para prever zonas de saturação no terreno (O’Loughlin, 1986; Montgomery e Dietrich, 1994; Dietrich e Montgomery, 1998).

12 Este modelo produz um índice de estabilidade relativa ($\log Q/T$), expresso na quantidade de precipitação crítica para iniciação dos processos (Equação 1). As áreas que possuem um mesmo índice de chuva crítica podem ser apontadas como possuidoras do mesmo tipo de controle topográfico em relação aos escorregamentos rasos (Montgomery e Dietrich, 1994).

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

(1)

13 “Q” é chuva crítica necessária para a ruptura [mm]; “T” é a transmissividade do solo [m²/dia]; “a” é a área de contribuição [m²]; “b” é o comprimento do contorno da célula [m]; “c” é a coesão do solo [Pa]; “θ” é o ângulo da encosta [°]; “ρ_w” é a densidade da água [kN/m³]; “ρ_s” densidade do solo [kN/m³]; “g” é a gravidade [m/s²]; “z” é a espessura do solo e “φ” é o ângulo de atrito interno [°].

14 O modelo SHALSTAB foi operado em sua versão disponível no SAGA GIS, utilizando parâmetros geotécnicos e hidrológicos variáveis e uniformemente distribuídos para bacia. Os parâmetros utilizados foram obtidos por revisão de literatura (Vieira *et al.*, 2015; Aristzábal *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2015; e Gomes e Vieira, 2016). Os dados foram selecionados com base em critérios de similaridade de geologia e clima entre a bacia do rio Gurutuba e as áreas trabalhadas pelos autores consultados.

15 Em seguida, foram realizados testes dos parâmetros, em que o mapa de suscetibilidade gerado foi comparado com o inventário de cicatrizes. Foram utilizados os seguintes valores: *densidade do solo seco (d)* mínima: 1,5g/cm³; “d” máxima: 1,6g/cm³; *profundidade do solo (p)* mínima: 2m; “p” máxima: 8m; *Condutividade hidráulica saturada (Ksat)*: 1,5012m/h; *Ângulo de Atrito Interno das partículas (AAI)* mínimo: 27°; *AAI* máximo: 36°; *Coesão aparente do solo (C’)* mínima: 0 MPa; *C’* máxima: 0,002MPa.

Suscetibilidade a partir do Valor Informativo

16 O método do Valor Informativo (VI) proposto por Yin e Yan (1988) consiste em um método estatístico bivariado, em que os fatores condicionantes do processo são selecionados pelo operador, assumindo-se que os escorregamentos futuros tendem a ocorrer nas mesmas condições em que ocorreram os escorregamentos anteriores (Pereira, 2009).

17 As variáveis selecionadas favorecem a ocorrência dos processos se seu VI for maior que 0. Caso o VI seja menor que 0, a variável não determina a ocorrência dos fenômenos (Jade e Sarkar, 1993; Zêzere, 1997). O cálculo do VI para um determinado elemento j (j = 1, [...], N) é feito com base nas equações 2 e 3:

$$i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N}$$

(2)

18 N representa o número total de elementos; S o número total de elementos com cicatrizes; S_i o número total de elementos com cicatrizes e que apresentam a variável i; e N_i o número total de elementos que apresentam a variável i.

$$L_j = \sum_{i=1}^M X_{ji} I_i$$

(3)

19 X_{ji} é o valor da variável i ($j = 1, [...], N$ e $i = 1, [...], M$), sendo que X_{ji} é igual a 1 se a variável i existe em determinado elemento j , e igual a 0 se a variável i inexistir em determinado elemento j ; M é o número de variáveis associadas em dada área; L_i corresponde ao valor informativo atribuído a cada variável i

20 O modelo do Valor Informativo foi aplicado definindo-se como fatores condicionantes os seguintes parâmetros morfológicos: ângulo de inclinação das encostas; aspecto; curvatura (planta/perfil); elevação; áreas de contribuição; e posicionamento da média encosta. Tais parâmetros foram escolhidos pela sua disponibilidade e pela ampla utilização em outros estudos tais como em Jade e Sarkar (1993); Zêzere (1997) e Pereira (2009). Foram produzidos dois cenários com o modelo do Valor Informativo: o primeiro considerando todos os parâmetros morfológicos gerados (Análise 01) e o segundo excluindo o parâmetro Posicionamento da Média Encosta (Análise 02), obtido pelo módulo *Relative Heights and Slope Positions* do SAGA GIS.

Validação e comparação da eficácia entre os métodos

21 Foi realizada uma validação cruzada para o modelo do Valor Informativo, a partir da divisão aleatória do inventário de cicatrizes em dois grupos de tamanho igual (168 cicatrizes). O Grupo I foi utilizado para o cálculo do Valor Informativo, enquanto que o Grupo II foi utilizado na validação dos resultados. Em um primeiro momento, os resultados foram validados por meio da Taxa de Sucesso (Chung e Fabbri, 2003), com ambos os grupos gerados. Em seguida, os modelos foram classificados em quatro classes de suscetibilidade de acordo com as quebras na geometria da curva de sucesso (Pereira, 2009). A Taxa de Sucesso também foi calculada para o modelo SHALSTAB, que dispensa a validação cruzada.

22 Em um segundo momento, foi empregado o método da matriz de contingência (Fawcett, 2006), que considera como Positivo (P) os pixels com escorregamento e Negativo (N) onde não há escorregamento, classificando os resultados de quatro maneiras: Verdadeiro Positivo (VP), quando a previsão classifica uma área como suscetível e nela constam cicatrizes; Falso Positivo (FP), quando a previsão indica como instáveis áreas que não apresentam cicatrizes; Falso Negativo (FN), quando o modelo classifica como estável e possui cicatrizes; e Verdadeiro Negativo (VN), se a previsão classifica como estável uma área que não apresenta cicatrizes.

23 Foram então produzidas: a Taxa de Verdadeiros Positivos ($TVP = VP / (VP + FN)$), que consiste na área total corretamente prevista como instável, em relação à área total prevista como instável; a Taxa de Falsos Positivos ($TFP = FP / (FP + VN)$), que consiste na área total prevista como instável sem a presença de cicatrizes, em relação à área total considerada estável; Acurácia ($ACC = VP + VN / (P + N)$), que indica a suscetibilidade corretamente classificada relativamente à área total; e a Precisão ($Pres = TP / (TP + FP)$), definida como a capacidade preditiva das áreas classificadas como instáveis, também chamada potencial de deslizamento.

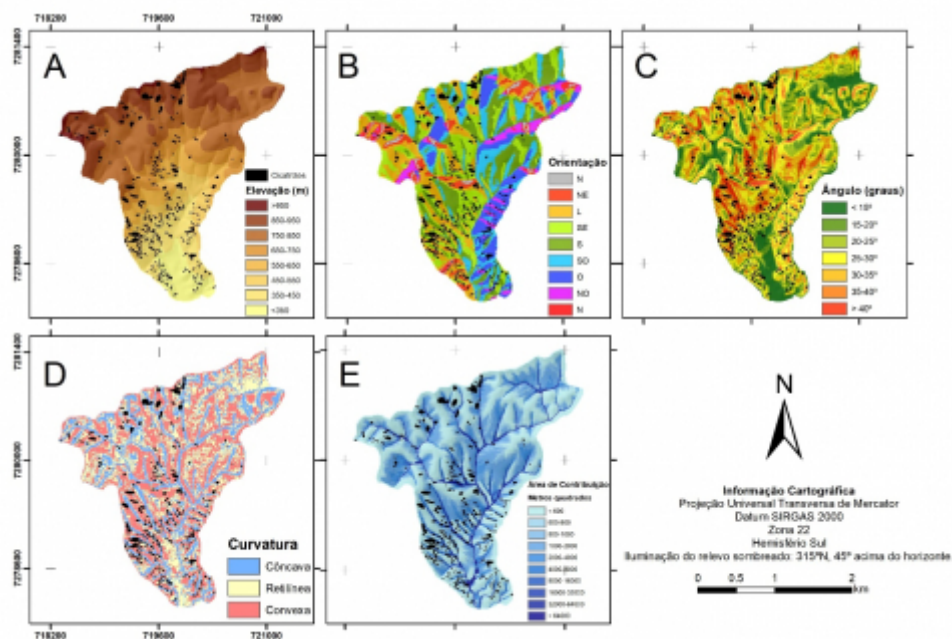
24 Foi calculada também a relação TVP/TFP , que consiste num indicador de qualidade do mapeamento, pois relaciona a área dos escorregamentos corretamente classificada com a área estável corretamente classificada. Em suma, quanto maior o valor assumido pela relação TVP/TFP , maior a qualidade do mapeamento produzido, já que isto indica uma maior taxa de acertos aliada a uma menor taxa de erro.

25 A comparação entre os dois modelos foi feita com base na Taxa de Sucesso obtida por cada modelo e com os índices de validação da Matriz de Contingência. No caso do modelo SHALSTAB, foram consideradas como instáveis na matriz de contingência as classes: Incondicionalmente Instável; 0-50mm/dia; 50-100mm/dia; e 100-200mm/dia. Para o Valor Informativo, as classes consideradas instáveis possuem VI positivo, sendo divididas em: Suscetibilidade Alta e Suscetibilidade Muito Alta.

Suscetibilidade a escorregamentos a partir de parâmetros morfométricos

26 Cerca de 30% da área possui altitudes entre 750 e 850m, concentrando quase 14% do total das cicatrizes. A maior concentração de cicatrizes (22,4%) ocorreu na classe altimétrica entre 850 e 950m, que ocupa apenas 22% da área da bacia. Este maior valor de CC pode ser explicado pela maior dimensão das cicatrizes (Carou *et al.*, 2017). A segunda maior concentração de cicatrizes ocorreu na classe entre 450 e 550m (~21%) que corresponde apenas a 9% da área total perfazendo sobretudo o terço médio da bacia.

Figura 3 - Mapas morfométricos da bacia do rio Gurutuba.



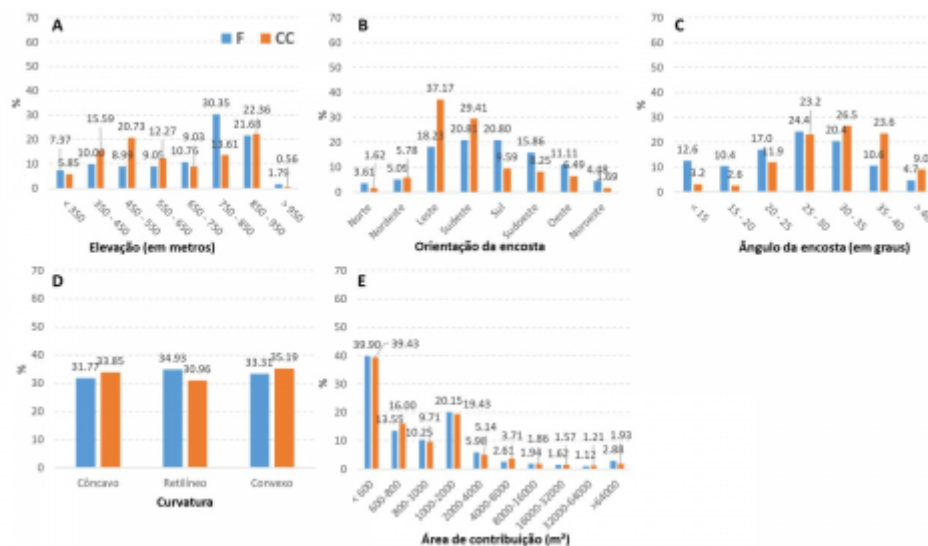
(A) Elevação; (B) Orientação das encostas; (C) Ângulo das encostas; (D) Curvatura (planta/perfil) das encostas; e (E) Áreas de contribuição.

27 As orientações predominantes foram Sul (21%), Sudeste (21%) e Leste (18%). Estas últimas tiveram os maiores índices CC, Leste (38%) e Sudeste (30%), totalizando quase 67% das cicatrizes (Figuras 3B e 4B). Os menores valores de CC correspondem às orientações Norte (1,6%) e Noroeste (1,7%), que também possuem os menores índices F (3,6% e 4,5%, respectivamente). Lin *et al.* (2016) em estudo realizado na região também apontaram como mais suscetíveis as encostas voltadas para Leste e Sudeste.

28 De acordo com Gao (1993), há uma diferença na quantidade de radiação solar recebida por uma encosta de acordo com sua orientação, sendo que, no Hemisfério Sul, as encostas voltadas para Norte recebem mais radiação solar e são, portanto, mais secas que aquelas voltadas para Sul. Assim, os menores valores de CC calculados para as encostas voltadas para Norte podem ter como causa esta relação entre orientação e quantidade de radiação solar recebida, que exerce influência na quantidade de umidade contida na encosta. Isso também pode ajudar a explicar a grande quantidade de escorregamentos deflagrados na bacia, já que a maior parte das encostas possui orientações para Sul e Sudeste.

29 Também é possível que a direção de deslocamento das massas de ar saturadas, cuja precipitação deflagrou os escorregamentos de 2014, tenha relação com os maiores valores de CC das encostas voltadas a Sul, Sudeste e Leste, tendo afetado mais intensamente encostas com estas orientações.

Figura 4 - Índices de Frequência (F) e Concentração de Cicatrizes (CC).



(A) Hipsometria; (B) Orientação das encostas; (C) Ângulo de inclinação das encostas; (D) Curvatura das encostas; e (E) Áreas de contribuição.

30 São predominantes as encostas com ângulos entre 25° e 30° (24,4%) e 30° e 35° (20,4%) (Figuras 3C e 4C). Notou-se uma maior Concentração de Cicatrizes (CC) a partir da classe entre 20 e 25° (23,2%), com o índice atingindo seu valor máximo na classe entre 30° e 35° (26,5%) e declinando nas classes com ângulos superiores a 35°. Este comportamento também foi observado por Fernandes *et al.* (2004) nas bacias dos rios Quitite e Papagaio (Rio de Janeiro, RJ), onde as cicatrizes se concentraram em encostas com ângulos entre 18° e 37°, sendo menos frequentes em áreas com inclinação superior. Similarmente, Martins *et al.*, (2017), ao analisarem o mesmo parâmetro para a Bacia do Bom Brinquedo (Antonina, PR), verificaram um maior CC em encostas com inclinação entre 20° e 40° (65%), com marcado declínio para inclinações maiores do que 40°. Além disso, o terço médio da bacia, onde Carou *et al.* (2017) observaram uma maior ocorrência de cicatrizes, corresponde à área onde os ângulos de inclinação tornam-se mais acentuados, tendo apresentado valores entre 25 e 40°.

31 O parâmetro de curvatura das encostas (Figuras 3D e 4D) teve uma distribuição similar entre as classes côncava (31,6%), retilínea (34,9%) e convexa (33,3%). As classes convexa e côncava tiveram as maiores concentrações de cicatrizes 35,2% e 33,9%, respectivamente, seguida pela retilínea com 31%. Ressalta-se que embora a literatura aponte que as curvaturas côncavas são mais suscetíveis devido à maior concentração de fluxos de superfície e subsuperfície (Montgomery e Dietrich, 1994), neste trabalho a presença de escorregamentos em todas as classes pode estar associada à magnitude do evento (elevados índices pluviométricos) e a outros fatores condicionantes como orientação e ângulo das encostas.

32 Por fim, aproximadamente 40% da área possui áreas de contribuição até 600m², sendo esta a classe que apresentou o maior índice CC, 39,43% (Figuras 3E e 4E). Houve uma tendência de decréscimo dos índices F e CC com o aumento do tamanho da área de contribuição, o que pode ser explicado pelo fato de que as zonas onde as áreas de contribuição têm valores muito elevados correspondem, principalmente, aos fundos de vale e áreas com ângulos de inclinação reduzidos (Vieira, 2007), onde não foram mapeadas cicatrizes do evento de 2014.

Suscetibilidade a partir do SHALSTAB

33 O mapa gerado a partir do modelo SHALSTAB (Figura 5) indicou quase a totalidade do terço médio da bacia como Incondicionalmente Instável, ou seja, áreas que apresentam instabilidade mesmo em condições de baixa ou nenhuma umidade. A Taxa de Sucesso foi de aproximadamente 64%. A avaliação que, de acordo com Guzzetti *et al.* (2006), ainda possui margem para ser melhorada.

34 Os índices da matriz de contingência (Tabela 1) apontaram que a análise com o modelo classificou 75% dos escorregamentos em áreas previstas como instáveis. A Taxa

de Falsos Positivos, no entanto, foi elevada (53%), o que indica uma grande quantidade de áreas previstas como instáveis e que não apresentaram cicatrizes, comparativamente ao total de áreas estáveis. A Acurácia (ACC) indicou que 47% da área da bacia teve suscetibilidade corretamente classificada, enquanto que o índice de Precisão foi de aproximadamente 0,042. A relação TVP/TFP foi de aproximadamente 1,40, indicando uma boa avaliação de suscetibilidade.

Figura 5 - Análise de suscetibilidade a partir do modelo SHALSTAB

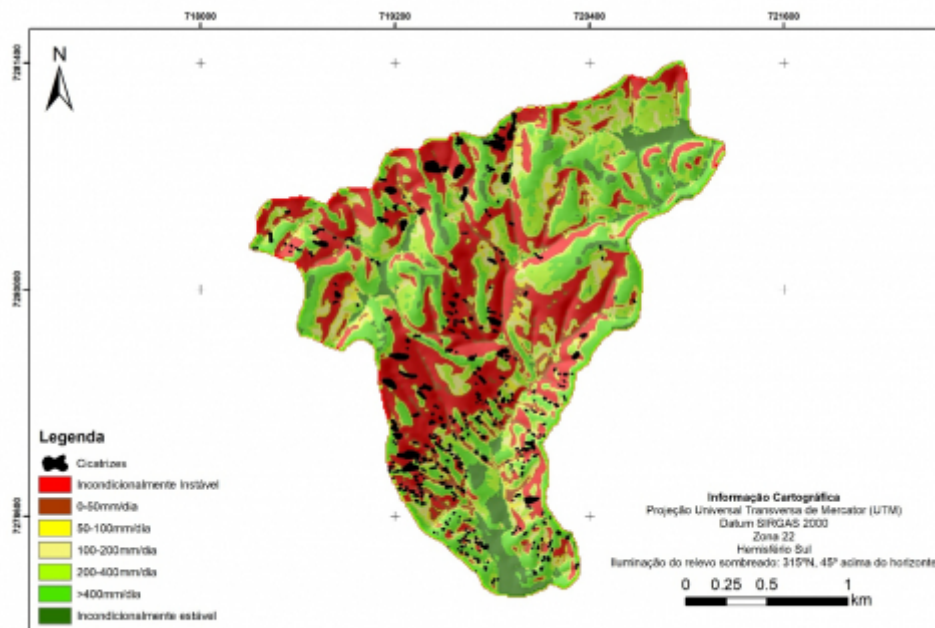


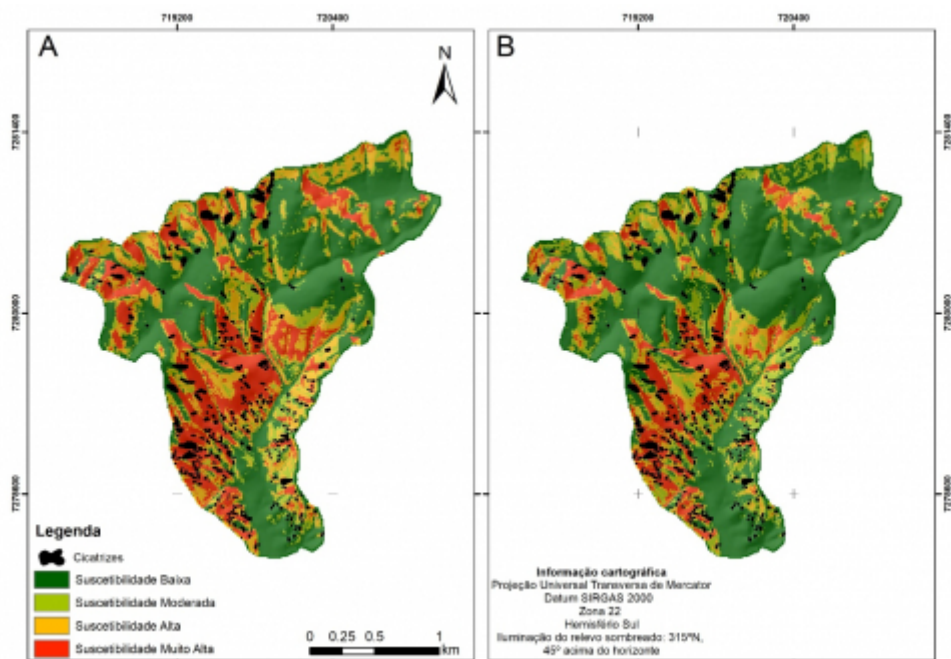
Tabela 1: Taxa de sucesso e índices de validação pela matriz de contingência para análise com modelo SHALSTAB

Modelo	Índices de Validação					
	Taxa de Sucesso	TVP	TFP	ACC	Precisão	TVP/TFP
SHALSTAB	0,6425	0,7525	0,537	0,47148	0,0425	1,4013

Suscetibilidade a partir do Valor Informativo

35 A validação dos mapas de Valor Informativo feita por meio da Taxa de Sucesso (Tabela 2), indicou valores de aproximadamente 73% para ambas as análises, que se diferenciam pelos parâmetros morfológicos definidos como condicionantes dos escorregamentos rasos (no caso, a Análise 02 não considera o parâmetro Posicionamento da Média Encosta). Ambos os mapas foram classificados (Figura 6) de acordo com as quebras na geometria de suas curvas de sucesso e então submetidos à matriz de contingência, tendo sido utilizados ambos os grupos de escorregamentos (Tabela 2).

Figura 6 - Análises de suscetibilidade a partir do modelo do Valor Informativo



(A) Análise 01; (B) Análise 02.

36 Embora a taxa de sucesso para ambas as análises seja virtualmente idêntica, os valores dos índices da matriz de contingência não apresentaram o mesmo comportamento. A validação com o Grupo I de cicatrizes indicou uma diferença significativa de TVP entre as Análises 01 e 02, de aproximadamente 18%, colocando a Análise 01 como a melhor performance do VI.

37 A TFP foi de aproximadamente 44% e 27% para as Análises 01 e 02, respectivamente. A Acurácia para a Análise 01 foi de cerca de 56% e, para a Análise 02 de 72%. O índice de Precisão foi de, aproximadamente, 0,029 para a Análise 01 e 0,036 para a Análise 02. A relação TVP/TFP também apresentou valores maiores para a Análise 02, de aproximadamente 2,27 em comparação com a Análise 01 (~1,81).

38 Embora estes índices tenham apresentado valores maiores para a Análise 02, a TVP muito mais elevada para a Análise 01 foi suficiente para que esta fosse considerada como melhor análise, já que a TVP indica a quantidade de áreas corretamente classificadas como instáveis pelo modelo. A melhor performance da Análise 01 é confirmada pela validação com o Grupo II, que também apresenta valores superiores de TVP, cerca de 15% maiores que os da Análise 02.

Tabela 2: Taxa de sucesso e índices de validação pela matriz de contingência para as análises com o modelo do Valor Informativo

Modelo; n° da Análise	Índices de Validação					
	Taxa de Sucesso	TVP	TFP	ACC	Precisão	TVP/TFP
VI; 01 (Grupo I)	0,73064	0,79301	0,437	0,56718	0,02923	1,81649
VI; 02 (Grupo I)	0,73039	0,61828	0,272	0,72604	0,03629	2,27165
VI; 01 (Grupo II)	0,6777	0,68041	0,438	0,563	0,02289	1,55069
VI; 02 (Grupo II)	0,68523	0,53333	0,274	0,72317	0,0284	1,94662

Comparação SHALSTAB x Valor Informativo

39 As Taxas de Sucesso (Tabela 3) indicaram que as Análises do VI obtiveram melhores performances em relação ao SHALSTAB. Entre as duas análises do VI, a diferença das taxas de sucesso é ínfima; entretanto, ambas as análises do VI apresentaram taxa de sucesso aproximadamente 10% mais alta que do SHALSTAB.

40 Os índices de validação pela Matriz de Contingência mostraram que a Análise 01 do VI apresentou TVP mais elevada, porém apenas 4% mais elevada que a do SHALSTAB. Associada a TVP mais elevada, a Análise 01 do VI possui TFP 10% mais baixa que aquela apresentada pelo SHALSTAB (43,7% contra 53,7%, respectivamente) e a ACC cerca de 10% mais elevada. Tal resultado significa que a Análise 01 do VI indicou menos áreas instáveis sem cicatrizes, classificando a suscetibilidade corretamente em relação ao SHALSTAB. A relação TVP/TFP tornou evidente a melhor performance da Análise 01 do VI em relação ao SHALSTAB, tendo apresentado valores significativamente mais elevados.

41 Embora a Taxa de Sucesso da Análise 02 do VI tenha sido superior, a TVP foi cerca de 14% mais elevada na Análise com o modelo SHALSTAB. Desta forma, embora os índices de TFP e ACC da Análise 02 tenham apresentado bons resultados, a baixa quantidade de escorregamentos corretamente classificados, torna a performance desta análise menos eficaz que a do modelo SHALSTAB e da Análise 01 do VI. Dado que a única diferença entre as duas análises do VI foi a retirada do parâmetro Posicionamento da Média Encosta na Análise 02, pode-se atribuir à ausência deste parâmetro a menor TVP alcançada.

Tabela 3: Taxas de sucesso e índices de validação pela matriz de contingência para comparação entre os modelos SHALSTAB e Valor Informativo

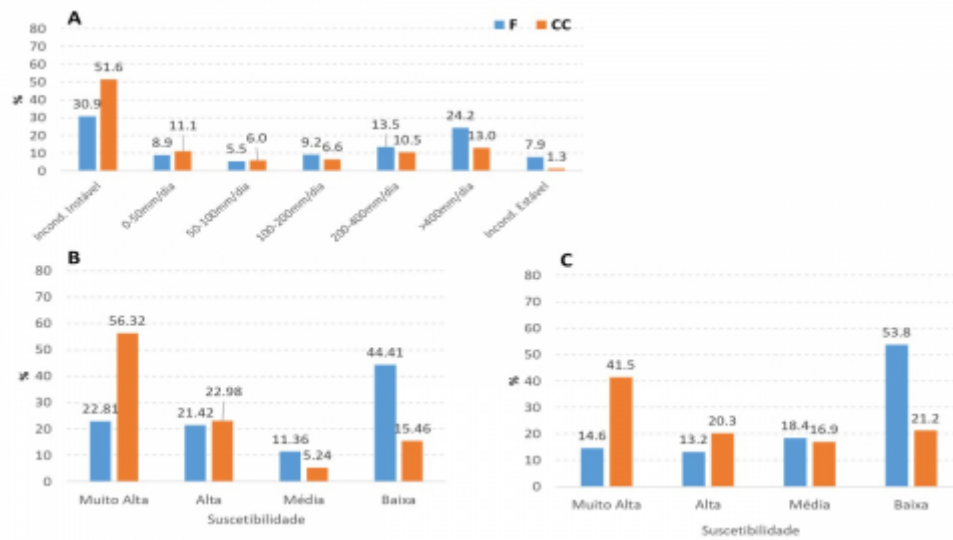
Modelo	Índices de Validação					
	Taxa Sucesso	TVP	TFP	ACC	Precisão	TVP/TFP
SHALSTAB	0,6425	0,7525	0,537	0,47148	0,0425	1,4013
VI; 01 (GRUPO I)	0,73064	0,79301	0,437	0,56718	0,02923	1,81649
VI; 02 (GRUPO I)	0,73039	0,61828	0,272	0,72604	0,03629	2,27165

42 Os índices de F e CC elaborados para as análises realizadas (Figura 7), notou-se que as classes consideradas estáveis pelo modelo SHALSTAB (200-400mm/dia; >400mm/dia; Incondicionalmente Estável) representam cerca de 46% da área total da bacia, com CC de 25% (Figura 7A).

43 No caso do Modelo do Valor Informativo, as classes consideradas estáveis (Suscetibilidade Média; Suscetibilidade Baixa) correspondem a 55,77% da área da bacia na Análise 01 (Figura 7B) e a 72,2% na Análise 02 (Figura 7C), com índices CC de 20,7% e 38,1%, respectivamente.

44 Ao analisar a distribuição do índice CC para as áreas consideradas instáveis pelo SHALSTAB, 75,2% das cicatrizes se concentram em áreas classificadas como instáveis, que perfazem 54,4% da área total. A Análise 01 do Valor Informativo apresentou índice CC de 79,3% para as áreas classificadas como instáveis, numa área equivalente a 44,23% da bacia; Na Análise 02, os valores de CC para estas classes foram de 61,8% em uma área correspondente a 27,8%. A partir disto, podemos afirmar que o modelo SHALSTAB apresentou uma superestimação de áreas instáveis quando seus resultados são comparados ao modelo do Valor Informativo, o que foi sugerido pelo valor mais elevado de TFP obtido e pela relação TVP/TFP, e evidenciado pela baixa quantidade de área classificada como estável em comparação com as predições realizadas com o Valor Informativo, sendo a Análise 01 a predição com melhor performance.

Figura 7 - Índices de F e CC



Índices de F e CC para: (A) Análise de suscetibilidade a partir do SHALSTAB; (B) Análise 01 do Valor Informativo; e (C) Análise 02 do Valor Informativo

Considerações finais

- 45 As áreas mais suscetíveis a escorregamentos rasos possuem altitudes entre 850 e 950m, orientação das encostas para Leste e Sudeste, ângulos de inclinação entre 30 e 35°, curvaturas convexa e côncava e áreas de contribuição menores que 600m².
- 46 O modelo estatístico do Valor Informativo apresentou melhor performance que o modelo SHALSTAB. Em trabalhos futuros, as análises com o modelo SHALSTAB podem ser melhoradas com a utilização de parâmetros hidrológicos e geotécnicos distribuídos, o que demandará um representativo número de medições em campo para realizar a espacialização dos parâmetros. Para análises futuras com o modelo do Valor Informativo, a inclusão de parâmetros como a litologia e a densidade de fraturas pode melhorar a performance do modelo, fatores estes que não foram incluídos pela ausência de mapeamentos geológicos em escala detalhada para a área de estudo.

Agradecimentos

- 47 Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processos n° 2016/20363-9 e 2017/09583-0), o apoio e comentários do Grupo de Pesquisas de Processos Morfodinâmicos da Universidade de São Paulo (GPMorfo-USP) e os colegas do Laboratório de Geografia Física da Universidade do Porto (Portugal).

Bibliographie

- ARISTIZÁBAL, E.; GARCÍA, E.; e MARTÍNEZ, C. Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basin basins and mountainous terrains. *Natural Hazards*, v. 78, p. 621-634, 2015.
DOI : 10.1007/s11069-015-1736-4
- BIERMAN, P.R.; e MONTGOMERY, D.R. Hillslope. In: *Key Concepts in Geomorphology*. Nova Iorque: Freeman and Company Publisher, 2014, p. 145-178.
- BROLLO, M. J.; SANTORO, J.; PENTEADO, D. R.; SILVA, P. C. F.; & RIBEIRO, R. R. Itaóca (SP): Histórico de acidentes relacionados a perigos geológicos. In: 15º Simpósio de Geologia do Sudeste/8º Simpósio do Cretáceo do Brasil. 2015, Campos do Jordão (SP). *Anais ... Campos do Jordão*, SBG, 2015.
- CARRARA, A.; CARDINALLI, M.; DETTI, R.; GUZZETTI, F.; PASQUI, V.; e REINCHENBACH, P. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 16, n. 5, p. 427-445, 1991.

- CAROU, C. B.; VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D.; & GRAMANI, M. F. Inventário dos escorregamentos da Bacia do rio Gurutuba, Vale do Ribeira (SP). *Revista do Departamento de Geografia USP, Vol. Especial*, p.172-179, 2017.
DOI : 10.11606/rdg.voispe.133377
- CHUNG-JO, F.C.; & FABRI, A.G. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, vol. 30, p.451-472, 2003.
- CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, v.8, n.7, p. 1991-2007, 2015.
- DIETRICH, W. & MONTGOMERY, D.R. SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), Technical Report 29, 1998.
- FALEIROS, F. M. *et. al.* Geologia e recursos minerais da Folha Apiaí – SG.22-X-B-V, Estados de São Paulo e Paraná, Escala 1:100.000. São Paulo: CPRM, 2012.
- FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, v. 27, p.861-874, 2006.
- FERNANDES, N.F., GUIMARÃES, R.F, GOMES, R.A.T. VIEIRA, B.C., MONTGOMERY, D.R. & GREENBERG, H. Topographic Controls of Landslides in Rio de Janeiro: Field Evidence and Modeling. *CATENA*, v. 55, p.163-181, 2004.
- GAO, J. Identification of Topographic Settings Conductive to Landsliding from Nelson County, Virginia, U.S.A. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 18, p. 579-591, 1993.
- GOMES, M.C.V.; e VIEIRA, B.C. Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Zeitschrift für Geomorphologie*, n. 60, p. 53-65, 2016.
- GRAMANI, M.F. A corrida de massa no córrego Guarda-Mão, município de Itaóca (SP): Impactos e observações de campo. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. (CBGE), 2015, Bento Gonçalves. *Anais ...*, Bento Gonçalves, 2015.
- GUZZETTI, F.; REINCHENBACH, P.; ARDIZZONE, F.; CARDINALLI, M.; E GALLI, M. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, v. 81, p. 166-184, 2006.
- JADE, S. & SARKAR, S. Statistical models for slope instability classification. *Engineering Geology*, v. 36, p.91-98, 1993.
- KIM, M.S.; ONDA, Y.; KIM, J.K.; e KIM, S.W. Effect of topography and soil parametrization representing soil thickness on shallow landslide modelling. *Quaternary International*, 2015, v. 384, p. 91-106, 2015.
- LIN, C.C.; GRAMANI, M.F.; & CAMPOS, A. B. Levantamento das cicatrizes de deslizamentos na bacia do Rio Gurutuba (SP) e correlações com parâmetros físicos. 18º Congresso Brasileiro de Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. *Anais ...*, Belo Horizonte, 2016.
- MARTINS, T.D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C., CORREA, A. C. B.; BATEIRA, C. V. M. Análise Dos Parâmetros Morfológicos de Escorregamentos Rasos na Serra do Mar, Paraná. *Caminhos de Geografia (UFU)*, v.18, p.223-239, 2017.
- MELLO, I.S.C. & BETTENCOURT, J.S. Geologia e Gênese das Mineralizações associadas ao Maciço Itaoca, Vale do Ribeira, SP e PR. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, nº 3, p.269-284, 1998.
- MONTGOMERY, D.R. & DIETRICH, W.E. A physically based model for topographic controls on shallow landsliding. *Water Resources Research*, v. 30, p.1153-1171, 1994.
- O'LOUGHLIN, E.M.O. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.
- PEREIRA, S.S. Perigosidade a movimentos de vertente na região Norte de Portugal. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Porto: Universidade do Porto, 2009.
- SELBY, M.J. Mass Wasting of Soils. In: *Hillslope Materials and Processes*. Segunda Edição. Oxford: Oxford University Press, p. 249-355, 1993.
- VIEIRA, B.C. Previsão de Escorregamentos Translacionais Rasos na Serra do Mar (SP) a partir de Modelos Matemáticos em Bases Físicas. Tese (Doutorado em Geografia) – Rio de Janeiro: UFRJ, 2007.
- VIEIRA, B.C.; FERREIRA, F.S.; e GOMES, M.C.V. Propriedades físicas e hidrológicas dos solos e os escorregamentos rasos na Serra do Mar Paulista. *Raega – O Espaço Geográfico em Análise*, v. 34, p. 269-287, 2015.
- YIN, K.L; e YAN, T.Z. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. *International Symposium in Landslides*, 1988, Lausanne. *Anais ...*, Lausanne, p.1269-1272, 1988.
- ZÊZERE, J. L. *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Tese (Doutorado em Geografia Física) Lisboa: Universidade de Lisboa, 1997.

Table des illustrations

	Titre	Figura 1 - Cicatrizes de escorregamentos rasos no município de Itaoca – Vale do Ribeira.
	Crédits	Fonte: Prefeitura Municipal de Itaoca.
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/30323/img-1.jpg
	Fichier	image/jpeg, 388k
	Titre	Figura 2 - Mapa de localização da bacia do rio Gurutuba no Estado de São Paulo e dos setores de maior ocorrência de escorregamentos.
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/30323/img-2.jpg
	Fichier	image/jpeg, 656k
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/30323/img-3.png
	Fichier	image/png, 4,2k
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/30323/img-4.png
$i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N}$	Fichier	image/png, 1,1k
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/30323/img-5.png
$L_j = \sum_{i=1}^M X_{ji} \cdot l_i$	Fichier	image/png, 1,2k
	Titre	Figura 3 - Mapas morfométricos da bacia do rio Gurutuba.
	Légende	(A) Elevação; (B) Orientação das encostas; (C) Ângulo das encostas; (D) Curvatura (planta/perfil) das encostas; e (E) Áreas de contribuição.
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/30323/img-6.jpg
	Fichier	image/jpeg, 404k
	Titre	Figura 4 - Índices de Frequência (F) e Concentração de Cicatrizes (CC).
	Légende	(A) Hipsometria; (B) Orientação das encostas; (C) Ângulo de inclinação das encostas; (D) Curvatura das encostas; e (E) Áreas de contribuição.
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/30323/img-7.jpg
	Fichier	image/jpeg, 136k
	Titre	Figura 5 - Análise de suscetibilidade a partir do modelo SHALSTAB
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/30323/img-8.jpg
	Fichier	image/jpeg, 296k
	Titre	Figura 6 - Análises de suscetibilidade a partir do modelo do Valor Informativo
	Légende	(A) Análise 01; (B) Análise 02.
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/30323/img-9.jpg
	Fichier	image/jpeg, 356k
	Titre	Figura 7 - Índices de F e CC
	Légende	Índices de F e CC para: (A) Análise de suscetibilidade a partir do SHALSTAB; (B) Análise 01 do Valor Informativo; e (C) Análise 02 do Valor Informativo
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/30323/img-10.jpg
	Fichier	image/jpeg, 97k

Pour citer cet article

Référence électronique

José Eduardo Bonini, Carlos Valdir de Meneses Bateira, Vivian Cristina Dias, Tiago Damas Martins et Bianca Carvalho Vieira, « Suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir de

Auteurs

José Eduardo Bonini

Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo.
jose.bonini@usp.br

Carlos Valdir de Meneses Bateira

Riskam, CEG, ULisboa/FLUP/UP (Portugal). carlosbateira@gmail.com

Vivian Cristina Dias

Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo.
vivian.cristina.dias@usp.br

Articles du même auteur

Parâmetros morfológicos e morfométricos como indicadores da magnitude das corridas de detritos na Serra do Mar Paulista [Texte intégral]

Paramètres morphométriques et morphologiques comme indicateur de l'ampleur des flux de débris dans la Serra do Mar Paulista

Morphometric and morphological parameters as indicators of the magnitude of debris flow in Serra do Mar Paulista

Paru dans *Confins*, 29 | 2016

Tiago Damas Martins

Universidade Federal de São Paulo. td.martins@unifesp.br

Bianca Carvalho Vieira

Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo. biancacv@usp.br

Articles du même auteur

Parâmetros morfológicos e morfométricos como indicadores da magnitude das corridas de detritos na Serra do Mar Paulista [Texte intégral]

Paramètres morphométriques et morphologiques comme indicateur de l'ampleur des flux de débris dans la Serra do Mar Paulista

Morphometric and morphological parameters as indicators of the magnitude of debris flow in Serra do Mar Paulista

Paru dans *Confins*, 29 | 2016

Droits d'auteur



Confins – Revue franco-brésilienne de géographie est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International.