
Implicações da resolução do MDT na modelagem de instabilidade de vertentes

The implication of DTM resolution on slope instability modeling

Influence de la représentation numérique de relief dans la modélisation de l'instabilité de versants

TIAGO D. MARTINS, BIANCA CARVALHO VIEIRA., JOSÉ EDUARDO BONINI. ET
CARLOS BATEIRA

<https://doi.org/10.4000/confins.33083>

Résumés

Português English Français

Os modelos matemáticos em bases físicas são importantes ferramentas para identificação de áreas potencialmente instáveis considerando aspectos geotécnicos e topográficos. Portanto, um modelo digital de representação do relevo é essencial, pois a partir destas representações é possível extrair as informações fundamentais, como a área de contribuição à montante e o ângulo de inclinação das vertentes. Este trabalho teve como objetivo realizar uma avaliação na resposta do modelo SHALSTAB quando alterado a resolução da célula (*grid*) que compõe um Modelo Digital de Terreno (MDT), elaborado a partir de dados topográficos convencionais (curvas-de-nível), em uma bacia hidrográfica com registros de escorregamentos rasos. Os resultados apontaram que não houve significativa melhora na definição de áreas potencialmente instáveis, quando das alterações da resolução do *grid* entre 10, 5 e 1 metro.

The mathematical models physically based are important tools to indicate potentially unstable areas using geotechnical and topographic information. Therefore, a digital elevation model is essential, since it is the base to obtain information as contribution area and slope angle, considered fundamental in its application. This work aimed to evaluate the response of the mathematical model physically based SHALSTAB with different size cell (resolution) on the Digital Terrain Model (DTM) derived from conventional topographic data (contour lines) in a watershed with shallow landslide record. The results indicate that there was no significant improvement in the definition of unstable areas when the DTM grid resolution changes (10, 5 and 1m).

Les modèles mathématiques basé physiquement sont des outils importants pour indiquer les zones potentiellement instables supporté par des informations géotechniques et topographiques. Par conséquent, un modèle numérique d'élévation est essentiel, car c'est la base pour obtenir des informations en tant que l'aire de contribution et angle de pente, considérés comme fondamentaux dans son application. Ce travail visait à évaluer la réponse du modèle

mathématique basé physiquement SHALSTAB avec différentes tailles de cellules (résolution) sur le modèle numérique de terrain (MNT) dérivé de données topographiques classiques (courbes de niveau) dans un bassin versant avec enregistrement du glissement de terrain peu profond. Les résultats indiquent qu'il n'y a pas eu d'amélioration significative de la définition des zones instables lorsque la résolution de la grille DTM change (10, 5 et 1 m).

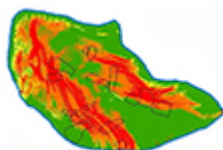
Entrées d'index

Index de mots-clés : Glissements de terrain pelliculaires ; SHALSTAB ; Serra do Mar.

Index by keywords: Shallow Landslides; SHALSTAB; Serra do Mar.

Índice de palavras-chaves: Escorregamentos Rasos; SHALSTAB; Serra do Mar, Paraná.

Texte intégral



Afficher l'image

- 1 Os modelos digitais de representação da superfície terrestre, comumente conhecidos como Modelos Digitais de Elevação (MDEs), são uma importante fonte de informações para os estudos geomorfológicos. A origem dos dados que irão compor esses modelos pode variar, desde àqueles elaborados a partir de isoípsas até os gerados por meio de tecnologias de sensores remotos, como o *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* ou o *Light Detection and Ranging (LiDAR)*.
- 2 Cada um destes dados possui particularidades de resolução, abrangência de cobertura, níveis de precisão e acurácia distintos, vindo representar apenas as elevações do terreno (Modelo Digital de Terreno – MDT), bem como as elevações por sobre o terreno, como benfeitorias e o dossel florestal (Modelo Digital de Superfície – MDS).
- 3 A capacidade de representação destes dados e suas implicações é um tema discutido com recorrência na literatura. Zhang e Montgomery (1994), por exemplo, avaliaram a reposta de produtos com diferentes resoluções de *grids*, variando entre 2, 4, 10, 30 e 90 metros. Os resultados apontaram uma influência da dimensão das células nas respostas da modelagem de fluxo, havendo uma melhora no *grid* de 10 metros em relação aos de 30 e 90 metros, mas nenhuma melhora significativa quando comparado com *grids* de 2 e 4 metros. Nesta mesma linha, Grohmann (2015) comparou diferentes Modelos Digitais de Elevação - MDEs (SRTM, ASTER GDEM e Topodata) com os dados do projeto Radiografia da Amazônia, identificando que o ASTER GDEM apresentou uma menor correlação com a morfologia do terreno.
- 4 Dentre os estudos geomorfológicos que fazem uso destes modelos digitais, têm-se àqueles relacionados ao mapeamento de áreas potencialmente instáveis a ocorrência de processos como os movimentos de massa. Estudos envolvendo esta temática tomaram vulto no Brasil, principalmente em face aos eventos catastróficos que afetaram, por exemplo, algumas cidades de Santa Catarina em 2008, a região serrana do Rio de Janeiro em 2011, as cidades de Antonina e Morretes no Paraná (2011), e municípios do Vale do Ribeira (SP) em 2014. De acordo com um levantamento organizado por Macedo e Martins (2015), entre os anos de 1988 e 2015 foram registrados 773 eventos de movimentos de massa em 243 municípios brasileiros, causando a morte de 3.396 pessoas.
- 5 Diferentes métodos vêm sendo desenvolvidos no intuito de indicar áreas potencialmente instáveis na paisagem, buscando compreender os mecanismos deflagradores do processo a partir de uma integração entre os fatores condicionantes da topografia, da morfometria do relevo, dos solo, das drenagens, da quantidade de precipitação e da dinâmica hidrológica (FERNANDES *et al.* 2001). Com os avanços no desenvolvimento de Sistema de Informação Geográfica (SIG), especialmente a partir dos anos de 1990, diferentes métodos foram desenvolvidos buscando apontar áreas suscetíveis a ocorrência dos processos de movimentos de massa. Dentre eles estão os

modelos em bases físicas que se apoiam em entendimentos matemáticos que permitem avaliar relações previsíveis a partir de variáveis dependentes e independentes (CHORLEY, 1967), expressando as relações observadas em campo ou as feições morfológicas através de equações matemáticas (FERNANDES, 2016).

- 6 Um exemplo é o modelo SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994) e operacionalizado em SIG por Dietrich e Montgomery (1998). O modelo calcula, para cada unidade do terreno de uma bacia hidrográfica, seu potencial de instabilidade para a ocorrência de escorregamentos rasos, baseando-se em parâmetros físicos do solo (coesão e ângulo de atrito), profundidade do solo, área de contribuição à montante e declividade. Deste modo, a representação digital do relevo é fundamental para a sua aplicação, uma vez que é a partir desta representação que se pode extrair as informações essenciais de área de contribuição à montante e os ângulos de inclinação das vertentes, que serão relacionadas com os parâmetros do solo (espessura, coesão e ângulo de atrito).
- 7 Desde os anos 2000 diversos trabalhos fazem uso do SHALSTAB no Brasil, como Guimarães *et al.* (2003a), Gomes *et al.* (2005), Zaidan e Fernandes (2009), Vieira *et al.* (2018), dentre outros. Gomes *et al.* (2005), em bacias hidrográficas na cidade do Rio de Janeiro, compararam os resultados do SHALSTAB utilizando dados topográficos em distintas escalas (1:10.000 e 1:50.000). Os autores apontaram uma diferença no percentual de área identificadas como Incondicionalmente Instável. Utilizando a escala 1:10.000 70% das cicatrizes de escorregamentos coincidiram com esta classe, mas utilizando a escala 1:50.000, este valor caiu bruscamente para 12%.
- 8 No intuito de identificar áreas potencialmente instáveis no município de Juiz de Fora (MG), Zaidan e Fernandes (2009) aplicaram o modelo e os resultados mostraram um alto percentual de acerto entre as classes mais instáveis e as cicatrizes mapeadas. Todavia, os autores destacaram dificuldades na elaboração do mapa de cicatrizes devido à dinâmica de ocupação da área. Dentre os variados trabalhos internacionais, vale mencionar Teixeira *et al.* (2014), que avaliaram a eficiência do SHALSTAB quando comparado ao Fator de Segurança, apontando que houve uma diferença de pouco mais de 2% em relação ao acerto de cada modelo.
- 9 Uma discussão mais aprofundada sobre as implicações de MDEs em análise de instabilidade poder ser verificada, por exemplo, em Claessens *et al.* (2005).
- 10 Deste modo, o presente trabalho questiona se uma melhor resolução do MDT implica em resultados mais eficientes na modelagem de instabilidade de vertentes. Com isso, o objetivo do trabalho foi avaliar a resposta de um modelo em base física (SHALSTAB) em face da resolução da célula que compõe o modelo digital de representação do relevo, considerando a aplicação dos mesmos valores dos parâmetros físicos do solo para uma área afetada por escorregamentos rasos. É importante destacar que foram adotadas informações referentes exclusivamente ao terreno (isoípsas) e, portanto, os modelos digitais são tratados, doravante, como Modelos Digitais de Terreno (MDTs).

O Modelo SHALSTAB

- 11 O SHALSTAB representa espacialmente a suscetibilidade potencial de ocorrência de escorregamentos translacionais rasos, tendo como área de aplicação uma bacia hidrográfica, a partir da compilação de um modelo de estabilidade das vertentes e de um modelo hidrológico em condição estável (*steady-state*) (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994). Os modelos combinados (estabilidade e hidrológico) determinam uma razão entre a quantidade de precipitação pluvial e a transmissividade do solo suficientes para ocorrência de uma ruptura. O primeiro se apoia em um modelo de estabilidade das vertentes baseado na equação do talude infinito, que define uma razão entre as tensões de sustentação e desestabilização dos materiais; o segundo se baseia na proposta de O'Loughlin (1986), que leva em conta a razão entre a concentração e a transmissão da água no solo, vindo a indicar, o padrão espacial de equilíbrio de saturação do solo, definido por uma área de contribuição a montante (Equação 1).

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

Onde:

q = precipitação pluvial crítica necessária para a ruptura [mm/dia]; T = transmissividade do solo (razão entre a condutividade hidráulica saturada e a espessura do solo) [m²/dia]; a = área de contribuição [m²]; b = comprimento do contorno da célula [m]; θ = ângulo da encosta [°]; ρ_w = densidade da água [g/cm³]; g = aceleração da gravidade [m/s]; z = espessura do solo [m]; ρ_s = densidade global do solo saturado [g/cm³]; φ = ângulo de atrito do solo [°]; c' = coesão efetiva do solo [kPa].

Dietrich e Montgomery (1998) hierarquizaram sete classes de estabilidade apoiados nos resultados da formulação, e que são adotados nos produtos gerados pelo modelo, apontando ao menos quatro usos potenciais do modelo: a geração de mapas de perigo; a indicação de áreas menos suscetíveis a escorregamentos para práticas de reflorestamento; planejamento de sistema viário; identificação/seleção de setores prioritários para análise (monitoramento) em bacias hidrográficas. Todavia, os autores não negam a possível ocorrência de incongruências nos resultados, que podem acontecer quando o modelo indica áreas não sujeitas a escorregamentos, mas que foram afetadas, ou, áreas sujeitas a escorregamentos, mas que ainda não foram afetadas (MONTGOMERY, *et al.*, 1998).

Um maior aprofundamento da formulação, que levou ao desenvolvimento do SHALSTAB, pode ser verificado em Guimarães *et al.* (2003), no qual destacaram que o modelo não condiciona à plataforma SIG a decisão de classificar níveis de estabilidade e em Dietrich *et al.* (2001), no qual destacam seu potencial de uso para áreas com poucas informações geotécnicas.

Área de Estudo

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Bom Brinquedo (BHBB), com 0,16 km², localizada no Morro do Bom Brinquedo, junto a área urbana do município de Antonina/PR (Figura 1). A área foi definida em face a disponibilidade de dados cartográficos em distintas escalas e por conter registros de eventos de escorregamentos rasos passíveis de identificação (cicatrices).

Essa área integra o compartimento dos Morros Isolados Costeiros (OKA-FIORI *et al.*, 2006) e foi severamente afetada (Figura 2) por um conjunto de movimentos de massa (escorregamentos rasos) deflagrados após um período de precipitação pluvial (98,6 mm/24hs) ocorridos em 11/03/2011, com um acúmulo de 263mm nos 10 dias antecedentes aos evento (MINEROPAR, 2013; PICANÇO *et al.* 2014).

Figura 1: Localização da Área de Estudo.



Fonte: ESRI, IBGE. Elaboração dos autores.

Figura 2: A) área urbana do município de Antonina (PR), circundada pelas Morros Isolados Costeiros; B) Área afetada por escorregamentos; C e D) Cicatriz de escorregamentos (em vermelho).

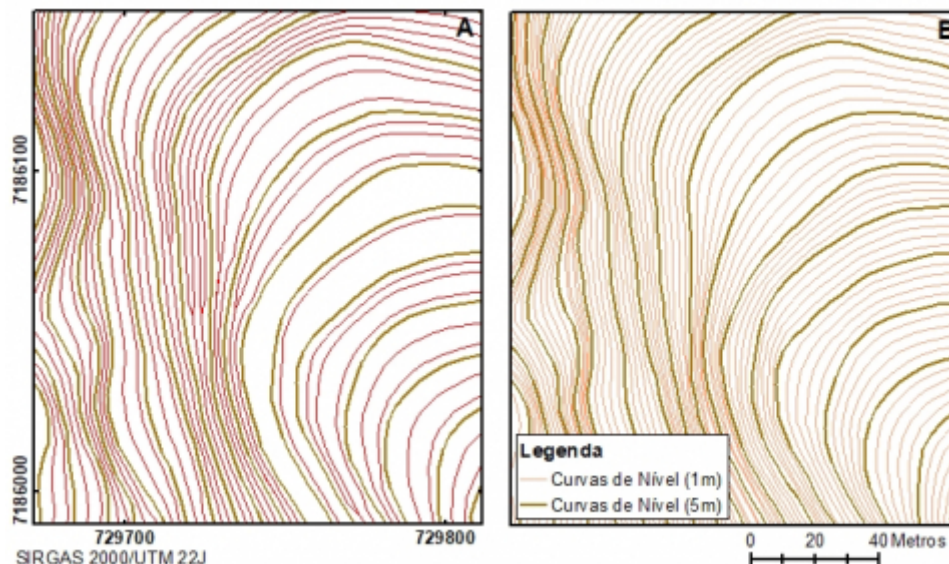


Fonte: Fotos dos autores em 2011 (B) e 2014 (A, C e D).

Materiais e Métodos

- 18 Os dados utilizados para a construção dos MDTs consistiram em: (a) curvas-de-nível com equidistância de 10 m, provenientes de carta topográfica em escala 1:25.000 (DSG, 2002); (b) curvas-de-nível com equidistância de 5 m; (c) curvas-de-nível com equidistância de 1 metro, sendo que estes dois últimos provenientes de dados topográficos em escala 1:2.000 do Plano Diretor Municipal (PMA, 2007). Não obstante, deve-se esclarecer que as curvas de nível de 1 metro resultaram de interpolação a partir das curvas de 5 metros e houve a necessidade de retificação das mesmas, o que foi realizado manualmente, não sendo, portanto, resultado de interpretação fotogramétrica (Figura 3).

Figura 3: (A) Curvas-de-nível com 1 e 5 metros de equidistância antes da retificação, e (B) após a retificação.



Fonte: Prefeitura municipal de Antonina. Elaboração dos autores.

- 19 Para a elaboração dos MDTs foi utilizado o método *r.surf.contour* (RSC) disponível no programa GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) (GRASS, 2017) e que permite a elaboração de um arquivo *raster* a partir de curvas-de-nível, sendo que a resolução do *grid* de cada MDT foi definida pelo valor da equidistância entre as curvas (10, 5 e 1m).
- 20 A aplicação do SHALSTAB foi feita a partir do programa SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*) (CONRAD et al. 2015). O primeiro procedimento foi o preenchimento de vazios (*fill sinks*), usando o método proposto por Planchon e Darboux (2001), sendo o produto (*raster*) desta aplicação o dado base para a operação do modelo. Na sequência foi obtido o *raster* de acúmulo de fluxo (*flow accumulation*) usando do método *Multiple Flow Direction*, além da representação do parâmetro de inclinação das vertentes (*Slope*).
- 21 Nos três testes (MDT 10, 5 e 1m) foram utilizados os mesmos valores dos parâmetros físicos do solo, obtidos na mesma bacia (BHBB) por Lopes (2013): Ângulo de Atrito (ϕ): 31°; Peso Específico (P_s): 2,6g/cm³; Profundidade (Z): 1m; e Coesão (c'): zero. Para a condutividade hidráulica (m/h) adotou-se o valor encontrado por Gomes e Vieira (2016), que realizaram medições usando um Permeâmetro de Guelph em uma bacia hidrográfica afetada por movimentos de massa na Serra do Mar paulista.
- 22 Para avaliar a eficiência dos resultados dos mapas de suscetibilidade foi feita uma verificação quanto à Distribuição das classes de instabilidade (D) dada pelo SHALSTAB (sete classes), ou seja, o percentual de ocorrência dessas classes em toda a bacia para cada um dos MDT's utilizados. Na sequência, foi empregado um mapa com 17 de cicatrizes de escorregamentos elaborado por Martins *et al.* (2017a) para a extração da Concentração de Cicatrizes (CC), que é o percentual de cada classe de instabilidade dado pelo modelo verificada apenas no interior da cicatriz, permitindo quantificar o percentual de ocorrência de classes mais ou menos instáveis em áreas que já sofreram ruptura. Esta abordagem tem sido adotada, satisfatoriamente, em diversos trabalhos que utilizaram o SHALSTAB (Guimarães *et al.*, 2003 e Vieira *et al.*, 2017, dentre outros).

Resultados e Discussões

- 23 O MDT-10 apresentou a maior diferença no valor médio das células (Tabela 1), aproximadamente 73, enquanto os outros dois mostraram-se muito similares. Porém, o menor desvio padrão ocorreu naquela mesma representação (38) contra valores muito similares dos MDTs 5 e 1. Já os valores mínimos das células são distintos, sendo que no MDT-10 foi de 20 metros e nos outros dois de 7 e 10 metros. Isso está associado ao

método de interpolação empregado, no qual as variações de valores mínimos e máximos não ultrapassam os valores altimétricos das curvas de nível. Assim é possível inferir uma limitação na capacidade dos dados originais (curvas de nível) em representar as menores altimetrias do relevo da bacia e, para as maiores altimetrias, essa diferença diminui entre os MDTs de melhor resolução (154 e 155), aumentando para o MDT-10 (150).

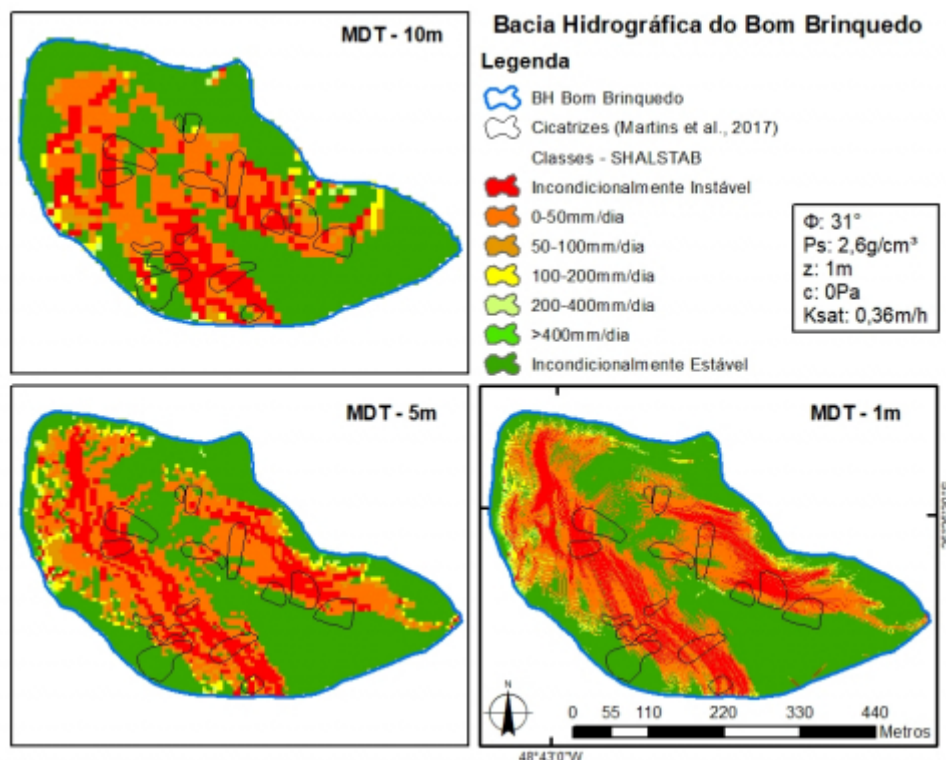
Tabela 1: Valores das células de cada MDT.

	Total de Células	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
MDT-1m	164.181	7	154	66,553	40,666
MDT-5m	6.580	10	155	66,796	40,734
MDT-10m	1.648	20	150	73,981	38,927

Elaboração dos autores.

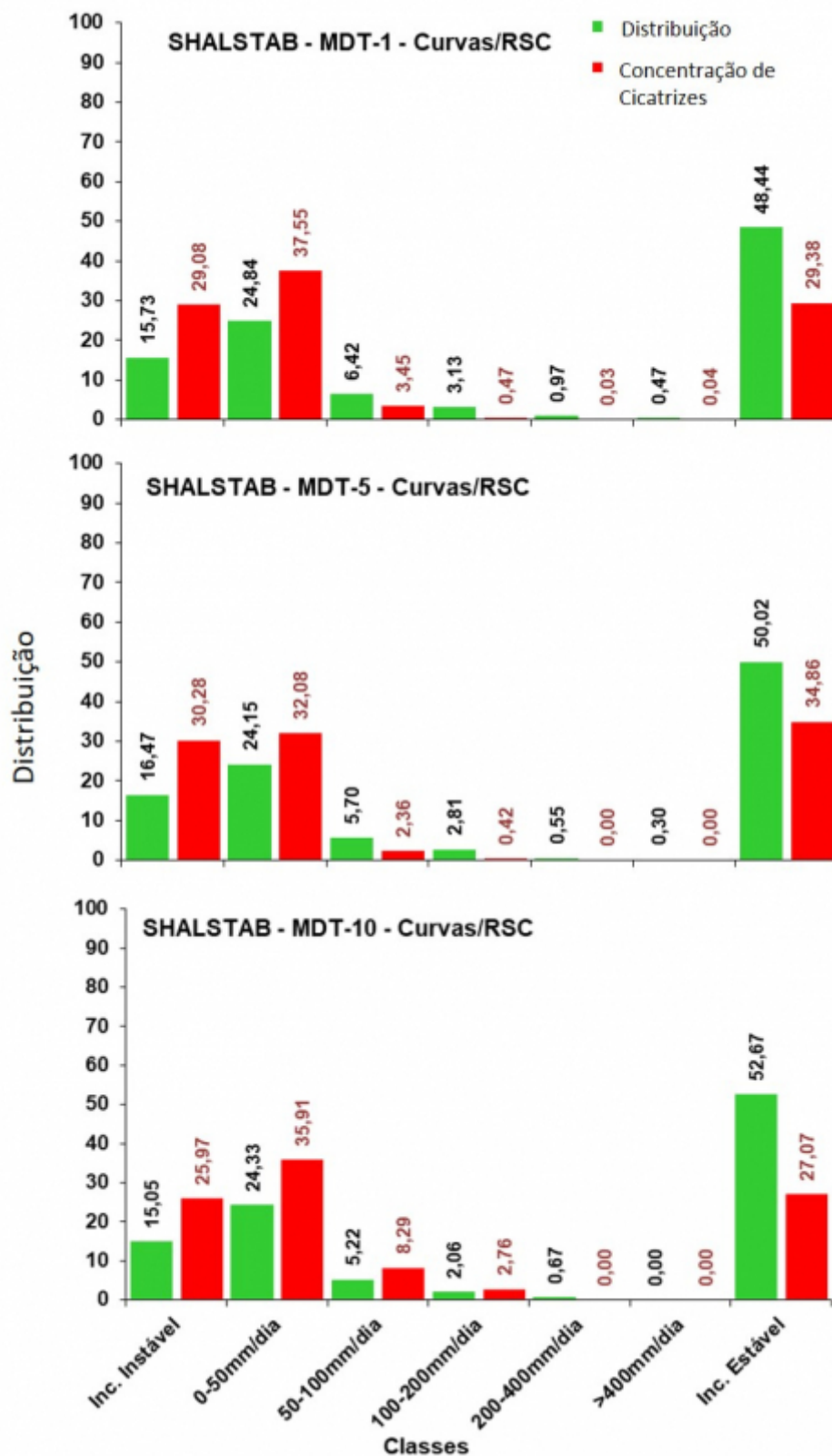
24 Os resultados revelaram que a classe Incondicionalmente Instável obteve a mesma Distribuição (D) nos três MDTs (Figura 4), sobremaneira nos trechos médios das vertentes. O MDT-5 obteve a maior D na classe mais instável, com um pouco mais de 16%, enquanto os outros dois MDTs possuem D em torno de 15%. Já para a segunda classe mais instável (0-50mm/dia), os três MDT's registraram valores próximos a 24%. Todavia, nos três testes a classe de maior D foi a Incondicionalmente Estável, 52, 50 e 48%, reduzindo conforme o aumento da resolução (10, 5 e 1m, respectivamente) (Figura 5).

Figura 4: Mapa de classes do SHALSTAB para a Bacia do Bom Brinquedo, considerando a variação da resolução dos MDTs (10, 5 e 1m).



Elaboração dos autores.

Figura 5: Gráficos de Distribuição de Classes (D) e Concentração de Cicatrizes (CC) do modelo SHALSTAB para a BHBB, considerando o MDT 1, MDT 5 e MDT 10.



Elaboração dos autores.

- 25 As quatro classes intermediárias apontaram baixos valores nos três casos, sendo que o MDT-10 registrou o menor valor na classe 50-100mm/dia (5,22%), não havendo grande distinção em relação aos outros dois MDTs, para esta mesma classe (5,7% e 6,4% para 5 e 1m, respectivamente). Vale destacar também que foram registrados valores próximos de zero, ou mesmo nulos, nos MDTs 10 e 5 para as classes 200-400mm/dia e >400 mm/dia (Figura 5). Essa insignificância nos valores intermediários encontra par no trabalho feito por Martins *et al.* (2017b), que analisaram a influência de MDTs de origens distintas quando aplicado o SHALSTAB. Naquele estudo os autores empregaram uma versão do SHALSTAB disponível em ambiente SIG (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998), que expressa os resultados, também em sete classes, a partir de uma razão logarítmica de precipitação e transmissividade (Log Q/T).

- 26 Considerando a Concentração de Cicatrizes (CC), o MDT-5 apresentou o maior valor para a classe mais estável (34%) e os dois outros, valores entre 27% (MDT-5) e 29% (MDT-1). Isso permitiu avaliar que, mesmo o MDT-5 tendo apresentado um maior CC para a classe mais instável, também marcou um maior falso positivo, lembrando que os outros dois também tiveram esse registro, mas com percentual menor.
- 27 Já para as duas classes de maior instabilidade somadas (Incondicionalmente Instável e 0-50mm/dia), o MDT-10 registrou 60%, o MDT-5 62% e o MDT-1, um pouco mais de 66%. Esses valores permitiram avaliar que o MDT-1 teve o melhor desempenho. Entretanto, é fundamental ressaltar que os percentuais de Distribuição e de Concentração de Cicatrizes devem ser avaliados não isoladamente, mas também considerando o número total de células que compõem o grid, uma vez que há um aumento no número de células do *grid* diante de uma maior resolução do *raster*, levando ao aumento do número de células de cada classe.
- 28 Vale lembrar que o SHALSTAB indica as vertentes potencialmente instáveis, partindo de uma condição “incondicionalmente estável” até uma situação “incondicionalmente instável”. Deste modo, para fins de definir qual área deve ser entendida como potencialmente instável deve-se considerar quais das classes de instabilidade serão adotadas na análise. Esse apontamento é trazido por Dietrich *et al.* (2001), que apresentaram uma discussão em que abordam qual, ou quais, dentre as classes do modelo, devem ser consideradas como instáveis, levando em conta a resolução grid. Segundo estes autores, para um *grid* de 5 metros é mais adequado considerar como potencialmente instável as áreas que ocorrem nas duas classes mais instáveis do modelo (Incondicionalmente Instável e 0-50mm/dia). Por conseguinte, as demais classes devem passar a ser consideradas quanto menor a resolução (Dietrich *et al.*, 2001).
- 29 Deste modo, é possível considerar que o MDT-1 teve um CC de um pouco mais de 29% para a classe Incondicionalmente Instável, o MDT-5, pouco mais de 62% (somando as duas classes mais instáveis) e o MDT-10, próximo a 70%, considerando as três classes mais instáveis. Já, levando em conta o CC para a classe mais estável, o MDT-10 apresentou o menor percentual, ou seja, um menor falso positivo.
- 30 Em resumo, a adoção de um *grid* de melhor resolução não permitiu um maior refinamento na distribuição de células instáveis no interior das cicatrizes, uma vez que os percentuais não foram tão discrepantes entre si (Figura 5). Além disso, todos os três testes tiveram algum percentual de ocorrência de classes estáveis no interior de cicatrizes (entre 27 e 35%).
- 31 Cabe apontar uma possível limitação da representação de 10 metros, pois indica valor zero em uma classe do SHALSTAB (>400mm/dia). Isso pode estar associado à incapacidade desta resolução em representar certas nuances do relevo que poderiam materializar esta classe, já que para as outras duas resoluções (5 e 1m) estas nuances foram representadas, ainda que minimamente e com decréscimo, a partir da resolução mais fina para a de 5 metros (0,47 e 0,3%). Em suma, um percentual muito pequeno de células do grid ocorreu dentro desta classe no MDT-5 e 1, enquanto no MDT-10, estas células não ocorreram.
- 32 Essa relação entre a resolução do grid e a área da bacia hidrográfica analisada é um fator que a ser levado em conta, uma vez que a aplicação de modelos, a exemplo do SHALSTAB, tem sido feita considerando resoluções e dimensões de bacia bastante distintas, assim como exemplifica o trabalho de Seefelder (2017) que, ao avaliar diferentes aplicações de modelos, identifica testes realizados em bacias com 820km² usando MDEs com 5 metros de resolução bem como 10km² adotando um grid de 30m.
- 33 Já o MDT de melhor resolução possui uma limitação que está expressa no trabalho em tela, pois deriva de curvas de nível geradas por interpolação e não de restituição fotogramétrica. A disponibilidade de produtos cartográficos de maior escala não é comum, a exemplo de dados do Portal de Mapas do IBGE (IBGE, 2019) que conta com 476 cartas topográficas em escala 1:25.000 do território brasileiro. Particularmente, no estado do Paraná (onde se insere a área de estudo deste trabalho), há disponibilidade 86 de cartas topográficas em escala 1:25.000 referente ao Projeto Pró-Atlântica, cuja área de cobertura se restringe a região da Serra do Mar e litoral (ITCG, 2019); não

existindo nestes dois bancos de dados disponibilidade de mapeamentos em escala de maior detalhe.

- 34 Diante dos resultados apontados, o MDT de menor resolução (10 metros) foi capaz de indicar áreas potencialmente instáveis de maneira satisfatória, não havendo melhora significativa quando do aumento da resolução. Tal afirmação encontra apoio em trabalhos anteriores, como o já mencionado Zhang e Montgomery (1994) que avaliaram a eficácia de modelos com resoluções variando de 90 a 2 metros, não encontrando melhora com dados de 4 e 2 metros. YUAN *et al.* (2008) ao avaliarem suscetibilidade a escorregamentos usando 11 diferentes dados com resolução (entre 5 e 190 metros), concluíram não haver uma melhor acurácia nos mapas com resolução mais refinada. Em trabalhos mais recentes, Oliveira *et al.* (2018), avaliaram a influência de modelos digitais de elevação de 1 e 5 metros no mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos, usando regressão logística. Estes autores também concluíram que não houve influência significativa nos resultados considerando as diferentes resoluções.

Conclusões

- 35 Os resultados mostraram que não houve significativa melhora na indicação de áreas potencialmente instáveis na bacia considerando os diferentes MDTs. Deste modo, aponta-se que a melhora na resolução aumentou o número de células definidas como Incondicionalmente Instáveis, mas não significou uma melhora direta na resposta do modelo de análise de instabilidade. Além disso, todos os testes indicaram a ocorrência da classe de estabilidade no interior das cicatrizes, sendo que o menor percentual foi no MDT de 10m.
- 36 Considerando a falta de mapeamento sistemático em escala de detalhe no Brasil, pode-se julgar adequado a aplicação do modelo fazendo uso de MDTs com resolução espacial de 10 metros. Entretanto, investigações futuras poderão aprofundar as análises sobre as implicações da dimensão da área da bacia e a resolução mínima e máxima mais adequadas para simulações de instabilidade de vertentes usando modelos (particularmente nos que se refere a obtenção da declividade e da área de contribuição) que possuem um forte apoio na representação topográfica.
- 37 O emprego de modelos matemáticos em base física para a análise de instabilidade de vertentes tem como dado básico a representação digital do relevo. Portanto, deve-se atentar para a relação entre a resolução do *grid* e a definição de qual, ou quais classes de instabilidade devem ser consideradas na validação dos mapeamentos, particularmente em modelos em que as classes indicam um aumento de potencial de instabilidade e não um único limite entre instável ou estável.

Bibliographie

- CHORLEY, R. J. << Models in Geomorphology >>. In: CHORLEY, R.J. e HAGGETT, P. (eds.). *Models in Geography*. Methuen e Co., Londres.43-96p. 1967.
- CLAESSENS, L.; HEUVELINK, G. B. M.; SCHOORL, J. M.; VELDKAMP, A. << DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling >>. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.30, p. 461-477. 2005.
- 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 >>, *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991-2007. 2015.
- DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R., << SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential >>. *National Council for Air and Stream Improvement*, 1998.
- DIETRICH, W.E.; BELLUGI, D.; ASUA, R.R. << Validation of Shallow Landslide Model, SHALSTAB, for Forest Management >>. *Land Use and Watershed: Influence on Hydrology and Geomorphology in Urban and Forest Areas. Water Science and Application. American Geophysical Union: Vol. 2. P: 195-227. 2001.*
- DSG. Diretoria de Serviços Geográficos. << Carta Topográfica Antonina. Folha SG.22-X-D-II-4-SO >>. 2002.

FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, F.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H. << Condicionantes Geomorfológicos dos Escorregamentos nas Encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis >>. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.2, n.1, p.51-71, 2001.

FERNANDES, N.F. << Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios >>. *Espaço Aberto, PPGG - UFRJ*, v. 6, p. 209-247, 2016.

GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; FERNANDES, N. F. << Análise de um Modelo de Previsão de Escorregamentos (Shalstab) em Diferentes Escalas Cartográficas >>. *Solos e Rochas*, São Paulo, v. 1, p. 85-97, 2005.

GRASS Development Team << Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.2. >> *Open Source Geospatial Foundation*. 2017.

GROHMANN, C.H. << 'Radiography of the Amazon' DSM/DTM data: comparative analysis with SRTM, ASTER GDEM >>. *Geomorphometry 2015*, Poznam, Poland. Proceedings. p. 9-11, 2015.

GOMES, M. C. V.; VIEIRA, B.C. << Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil >>. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, v. 60, p. 53-65, 2016.

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

GUIMARÃES, R.F.; FERNANDES, N.F.; GOMES, R.T.A.; CARVALHO JUNIOR, A.B. << Fundamentação Teórica Do Modelo Matemático Para Previsão De Escorregamentos Rasos Shallow Stability >>. *Espaço e Geografia*. Vol.6, Nº 2, p. 133:150. 2003b.

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

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. << Portal de Mapas >>. Disponível em: < <https://portaldemapas.ibge.gov.br> >.

ITCG. Instituto Instituto de Terras, Cartografia e Geologia. << Dados Espaciais de Referência >>. Disponível em: < <http://www.itcg.pr.gov.br> >.

LOPES, F.C.A. *Avaliação da Influência da Distribuição Espacial da Espessura do Solo e do Nível Freático na Estabilidade de Encosta*. 2013. Dissertação de mestrado (Mestrado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2013.

MACEDO, E.S.; MARTINS, P.P.D. << Análise do banco de dados de mortes por escorregamentos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) >>. In: *Congresso Brasileiro de Geologia De Engenharia e Ambiental*, 15., 2015, Bento Gonçalves. São Paulo: ABGE, 2015. cd-rom. 7p.

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, 2017a.

MARTINS, T.D.; OKA-FIORI, C. ; VIEIRA, B. C. ; BATEIRA, C. V. M. ; MONTGOMERY, D. R. << Avaliação de MDT na Modelagem de Instabilidade de Vertentes >>. *Revista Ra'e Ga Espaço Geográfico em Análise*, v. 41, p. 07-19, 2017b.

MINEROPAR. Minerais do Paraná S.A. << Avaliação geotécnica de vertentes na área urbana de Antonina >>. *Relatório Técnico*. v. 1, e 2. 2013.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. << A physically based model for the topographic control on shallow landsliding >>. *Water Resources Research* 30: 153-171. 1994.

MONTGOMERY, D. R., SULLIVAN, K.; GREENBERG, M. H. << Regional Test of a Model for Shallow Landsliding >>. *Hydrological Processes*, v. 12. p.943-955. 1998.

O'LOUGHLIN, E. M. << Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis >>. *Water Resources Research*. V.22: 794-804.1986.

OKA-FIORI; SANTOS, L.J.C.; CANALI, N. E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. << Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000 >>. *Minerais do Paraná – MINEROPAR*, Curitiba, 59 p. 2006.

OLIVEIRA, A.; FERNANDES, J.; BATEIRA, C.; FARIA, A.; GONÇALVES, J. << Influence of Digital Elevation Models on Landslide Susceptibility with Logistic Regression Model >>. *Revista do Departamento de Geografia*, 36, 33-47. 2018.

PLANCHON, O.; DARBOUX, F. << A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models >>. *Catena* 46: 159-176. 2001.

PICANÇO, J.; MESQUITA, PINTO, M.J., ATHAYDE, C. << Typology of Rainfall-Triggered Landslides in the Urban Area of Antonina, Southern Brazil >>. In: SASSA K; CANUTI, P; YIN Y. (Org.). *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. 1ed.Dordrecht: Springer Verlag internacional, v. 3, p. 379-383. 2014.

PMA. Prefeitura Municipal de Antonina. << Plano Diretor Municipal >>. 2007.

SEEFELDER, C.L.N. *Estudo da Influência dos Parâmetros Hidrogeológicos na Análise de Susceptibilidade à Escorregamentos Rasos Por Meio de Modelo de Estabilidade de Encostas*. Tese de Doutorado (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. 212p. 2017.

TEIXEIRA, M.; BATEIRA, C.; MARQUES, F.; VIEIRA, B.C. << Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal >>. *Landslides* (Berlin. Print), v. 14, p. 1-20, 2014.

VIEIRA, B.C.; FERNANDES, N. F.; AUGUSTO FILHO, O.; MARTINS, T. D.; MONTGOMERY, D. R. << Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil >>. *Environmental Earth Sciences*, v. 77, p. 260, 2018.

TIAN, Y.; XIAO, C.; LIU, Y.; WU, L. << Effects of raster resolution on landslides suscetibility mapping: A case study of Shenzhen >>. *Science in China Series E: Technological Sciences* (Science in China Press). Vol. 51. Supp. II, p. 188-198. 2008.

ZAIDAN, R.T.; FERNANDES, N.F. << Zoneamento de Suscetibilidade a Escorregamentos Rasos em Encostas Aplicado à Bacia de Drenagem Urbana do Córrego do Independência – Juiz de Fora (MG) >>. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v.10, nº 2, p. 57-76, 2009.

ZHANG, W; MONTGOMERY, D.R. << Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations >>. *Water Resources Research*, v30, Issue 4, pg. 1019-1028. 1994.

Table des illustrations

	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/33083/img-2.png
	Fichier	image/png, 10k
	Titre	Figura 1: Localização da Área de Estudo.
	Crédits	Fonte: ESRI, IBGE. Elaboração dos autores.
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/33083/img-3.jpg
	Fichier	image/jpeg, 495k
	Titre	Figura 2: A) área urbana do município de Antonina (PR), circundada pelas Morros Isolados Costeiros; B) Área afetada por escorregamentos; C e D) Cicatriz de escorregamentos (em vermelho).
	Crédits	Fonte: Fotos dos autores em 2011 (B) e 2014 (A, C e D).
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/33083/img-4.jpg
	Fichier	image/jpeg, 518k
	Titre	Figura 3: (A) Curvas-de-nível com 1 e 5 metros de equidistância antes da retificação, e (B) após a retificação.
	Crédits	Fonte: Prefeitura municipal de Antonina. Elaboração dos autores.
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/33083/img-5.jpg
	Fichier	image/jpeg, 389k
	Titre	Figura 4: Mapa de classes do SHALSTAB para a Bacia do Bom Brinquedo, considerando a variação da resolução dos MDTs (10, 5 e 1m).
	Crédits	Elaboração dos autores.
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/33083/img-6.jpg
	Fichier	image/jpeg, 458k
	Titre	Figura 5: Gráficos de Distribuição de Classes (D) e Concentração de Cicatrizes (CC) do modelo SHALSTAB para a BHBB, considerando o MDT 1, MDT 5 e MDT 10.
	Crédits	Elaboração dos autores.
	URL	http://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/33083/img-7.jpg
	Fichier	image/jpeg, 119k

Pour citer cet article

Référence électronique

Tiago D. Martins, Bianca Carvalho Vieira., José Eduardo Bonini. et Carlos Bateira, « Implicações da resolução do MDT na modelagem de instabilidade de vertentes », *Confins* [En ligne],

Auteurs

Tiago D. Martins

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

Bianca Carvalho Vieira.

Universidade de São Paulo. biancacv@usp.br

José Eduardo Bonini.

Universidade de São Paulo. jose.bonini@usp.br

Carlos Bateira

Riskam,CEG, ULisboa/FLUP, UPorto. carlosbateira@gmail.com

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.