

R. Ra'e Ga
Curitiba, v.41 Temático de Geomorfologia , p. 07 -19 , Ago/2017

DOI: 10.5380/raega
eISSN: 2177-2738



AVALIAÇÃO DE MDT NA MODELAGEM DE INSTABILIDADE DE VERTENTES DTM ASSESMENT IN SLOPE INSTABILITY MODELING

Tiago D. Martins¹, Chisato Oka-Fiori², Bianca Carvalho Vieira³, Carlos V. M. Bateira⁴, David R. Montgomery⁵

RESUMO

Uma parte dos métodos de previsão de escorregamentos na paisagem tem como base principal a topografia, que pode ser gerada sob diferentes formas e ferramentas. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de dois Modelos Digitais de Terreno (MDT's) baseados nos pontos LiDAR e em curvas de nível em um mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos rasos. Para avaliar os MDT's, fez-se uso do modelo em base física SHALSTAB. Os testes foram realizados em uma bacia hidrográfica afetada por escorregamentos rasos deflagrados após intensa precipitação, em março de 2011, na área urbana do município de Antonina (PR), na parte Sul da Serra do Mar. Os dados das propriedades físicas do solo necessários foram obtidos no interior de uma das cicatrizes de escorregamento de 2011. No intuito de avaliar o mapa de suscetibilidade, foram comparados os padrões espaciais das classes de instabilidade previstas pelo SHALSTAB com o mapa de cicatrizes. Dentre os resultados foi verificado que um dos índices de validação apresentou melhor performance do MDT derivado do LiDAR, enquanto que no segundo foi constatado uma reduzida diferença entre os MDT's, sendo que ambos demonstraram uma similar distribuição na frequência de classes.

Palavras-chave: SHALSTAB; LiDAR; Escorregamentos Rasos; Serra do Mar.

ABSTRACT

Part of the landslide prediction methods in the landscape is mainly based on the topography, which can be generated in different forms and tools. Thus, this paper aimed to assess the efficiency of two sets of Digital Terrain Model (DTM), based on LiDAR data, and on traditional contour lines in a mapping of areas susceptible to shallow landslides. To evaluate the DTMs, we used the physically based model, SHALSTAB. The tests were carried out in a watershed affected by shallow landslides caused by intensive rainfall during March 2011, in the urban area of Antonina municipality (Parana State), the southern part of the Serra do Mar mountain range. The physical soil properties data needed for the model consisted of two sets of values (literature) measured from 2011 landslide scars. In order to validate the landslide susceptibility maps, we compared the spatial pattern of instability classes predicted by SHALSTAB with the mapped landslide scars. To evaluate the susceptibility map, we compared the spatial patterns of instability classes provided by SHALSTAB with the maps of scars. Among the results, it was verified that in one of the validation indexes presented a better performance of LiDAR-derived DTM, whereas, the second index was identified a small difference between DTMs, also both demonstrated a similar distribution of class frequency.

Key-words: SHALSTAB; LiDAR; Shallow Landslides; Serra do Mar.

Recebido em: 06/07/2016

Aceito em: 20/06/2017

¹ Universidade Federal do Pernambuco, Recife/PE, e-mail: martins.td@ufpr.br

² Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, e-mail: chisato@ufpr.br

³ Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, e-mail: biancavc@usp.br

⁴ Universidade do Porto, Porto/Portugal, e-mail: carlosbateira@gmail.com

⁵ University of Washington, Seattle/E.U.A, e-mail: bigdirt@uw.edu

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 1990, paralelamente ao avanço dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), métodos preditivos foram desenvolvidos no intuito de identificar a variação espacial da suscetibilidade a ocorrência de escorregamentos. Dentre eles, estão aqueles que se apoiam em modelos matemáticos em bases físicas que, segundo Chorley, (1967, p.60) “são baseados nas noções matemáticas clássicas de relações exatamente previsíveis, entre variáveis independentes e dependentes”

O modelo SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*), se destaca pelo seu uso em diferentes regiões do mundo, assim como no Brasil. Trata-se de um modelo matemático em base física que calcula para cada unidade (célula) do terreno, em uma bacia hidrográfica, seu potencial de instabilidade, baseando-se em parâmetros como as propriedades físicas do solo, fluxo d'água em subsuperfície e, destacadamente a topografia, que, por meio do Modelo Digital de Terreno (MDT) fornece os parâmetros de área de contribuição e ângulo das vertentes (Montgomery; Dietrich, 1994; Dietrich; Montgomery, 1998; Montgomery *et al.*, 1998).

No Brasil distintos trabalhos aplicaram o SHALSTAB, a exemplo de Guimarães *et al.* (2003), Zaidan e Fernandes (2009), Michel *et al.* (2014), Vieira e Ramos (2015), cujos resultados expressaram seu potencial em identificar áreas instáveis. Entretanto, os trabalhos mencionados fizeram uso de dados topográficos convencionais, como curvas de nível, para a construção do MDT. Todavia, diante da permanente introdução de distintas tecnologias que permitem aprimorar a aquisição de dados topográficos, como o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), foi indagado qual tipo de dado (curvas de nível ou LiDAR) traria respostas mais eficientes.

Diferentes trabalhos utilizaram o MDT derivado do LiDAR (MDT-LiDAR) para análises de feições geomorfológicas, a exemplo de estudos de movimentos de massa, com resultados positivos na identificação de eventos pretéritos (pré-históricos) e na elaboração de inventários (SCHULZ, 2004; BAUM *et al.*, 2005; GLENN *et al.*,

2006; SCHULZ, 2007; GUZZETTI *et al.*, 2012; RAZAK *et al.*, 2013).

Com o intuito de avaliar o MDT-LIDAR, Schulz (2004), por exemplo, mapeou os escorregamentos junto à zona costeira de Seattle (EUA) para fins de comparação entre os seus resultados e os mapeamentos anteriores. O autor destacou que a qualidade dos dados analisados (um ponto/m²) permitiu a identificação de feições com no mínimo 30 metros de extensão e poucos metros de altura, contudo, feições entre <1 e 2 metros foram melhor identificadas por meio de ortofotos.

Posteriormente, SCHULZ (2007) verificou que a vegetação densa inibiu a identificação de feições de escorregamentos por meio de fotografias aéreas, mas utilizando os dados LiDAR, obtidos durante a estação com ausência de folhagem na vegetação, foi possível identificar aspectos topográficos dos escorregamentos, como os escorregamentos mais antigos, os limites daqueles mais recentes e também escorregamentos mais complexos. Segundo o autor, foi possível mapear ao menos quatro vezes mais escorregamentos do que àqueles realizados por métodos tradicionais (fotografias aéreas e trabalhos de campo).

Baum *et al.* (2005), também na região de Seattle (EUA), fizeram uso de dados levantados pelo LiDAR objetivando desenvolver um banco de dados em ambiente SIG para mapear a probabilidade de ocorrência de deslizamentos (ao longo do tempo), e definir limites críticos de precipitação pluvial para deflagração destes processos. Os autores mostraram que os dados do LiDAR foram mais eficientes na superfície do relevo sob a vegetação mais densa, destacando também que este sistema permitiu identificar áreas instáveis nos terrenos, mesmo com poucos dados geológicos e geotécnicos. Já Glenn *et al.* (2006), fazendo uso do LiDAR e de levantamento topográfico, definiram feições decorrentes de movimentos de massa em bordas de dois cânions no sudeste do estado de Idaho (EUA) e verificaram que o MDT-LiDAR possui um potencial na diferenciação de componentes morfológicos no interior dos escorregamentos,

além de contribuir na classificação de material e do mecanismo de ruptura do escorregamento.

Em uma revisão sobre novas ferramentas para inventários de escorregamentos, Guzzetti *et al.* (2012) argumentaram sobre a eficiência do MDT-LiDAR, destacando que a riqueza de detalhes dos dados favorece uma identificação visual mais apurada de feições como curvatura e rugosidade do relevo. Sobre o uso desta tecnologia, Razak *et al.* (2013) apontaram que os MDT's obtidos foram satisfatórios para o mapeamento e para a elaboração de um inventário dos escorregamentos em Cameron Highlands (Malásia), permitindo, mesmo em zona de floresta equatorial, uma espacialização apurada das feições.

Destaca-se, porém, que a disponibilidade de dados de varredura laser aerotransportado não abrange grandes extensões territoriais (GUZZETTI *et al.*, 2012). Adiciona-se a isto uma lacuna em trabalhos considerando o modelo digital do relevo, derivado do LiDAR, em análises relacionadas aos movimentos de massa e seus processos correlatos nas zonas tropicais e subtropicais brasileiras, em especial para escorregamentos rasos.

Vale notar, porém, o trabalho de Cavalcanti *et al.* (2013), que buscou criar cenários de inundação baseados em curvas de nível geradas a partir de pontos LiDAR, para a bacia hidrográfica do Rio Una, estado do Pernambuco. Neste trabalho, os autores definiram cotas topográficas máximas de inundação e o seu potencial de atingir áreas residenciais. Ainda

fazendo uso de dados LiDAR para geração de curvas de nível, e por conseguinte um MDT, Michel *et al.* (2014), avaliaram e compararam os resultados do modelo SHALSTAB e SINMAP em uma bacia afetada por escorregamentos em 2008, no estado de Santa Catarina.

Destarte, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta do modelo SHALSTAB, na indicação de áreas suscetíveis a escorregamentos rasos quando comparados dois distintos conjuntos de dados para a geração do MDT.

2.ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo selecionada foi a Bacia Hidrográfica das Laranjeiras (BHL) (Figura 1), com 171.800m², localizada no setor norte do perímetro urbano do município de Antonina (PR), devido à ocorrência de cicatrizes de escorregamentos, à disponibilidade de dados LiDAR e das propriedades físicas do solo.

A área onde se localiza a bacia foi afetada por diversos escorregamentos (Figura 2) em 11 de março de 2011, deflagrados após um intenso período de precipitação pluvial, no qual foi registrado um valor de 98,6 mm para a data do evento, e com um acúmulo de 263 mm entre o período de 01/03/2011 a 11/03/2011, conforme os dados fornecidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná. Após este episódio foi realizado um estudo geotécnico (MINEROPAR, 2013), que identificou na área a ocorrência de corpos graníticos, anfíbolitos, quartzitos, sedimentos marinhos recortados por diques de diabásio porfirítico, com orientação Sudeste-Noroeste.

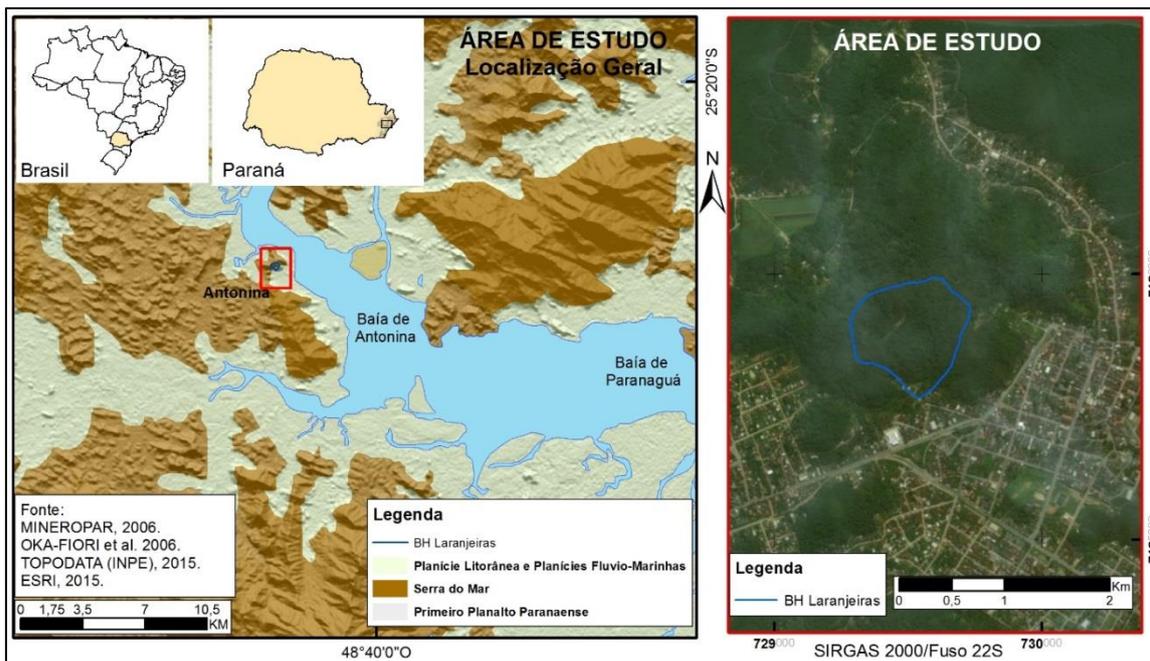


Figura 1 - Localização geral da área de estudo. Organização dos Autores.



Figura 2 - Movimentos de massa ocorridos no Morro do Bom Brinquedo, em 11 de março de 2011; A) área afetada no setor Sudoeste do Morro e B) cicatriz remanescente de escorregamento do Morro. Fotos dos autores.

O sítio urbano do município de Antonina concentra-se junto à orla da baía (homônima) sobre a subunidade morfoescultural da Planície Litorânea e Planícies Flúvio Marinhas, sendo circundadas pelas elevações dos Morros Isolados Costeiros. A primeira é caracterizada por baixa dissecação com elevações variando entre 0 a 200 m.s.n.m., marcada por planícies de restingas e flúvio-marinhas, e a segunda por alta dissecação do relevo, com predominância de cimeiras alongadas, vales em "V" fechado, vertentes retilíneas e altitude variando entre 200 a 920 m.s.n.m. (OKA-FIORI, et al. 2006; SANTOS et al.,

2006; MINEROPAR, 2006). Estas subunidades apresentam peculiaridades no que tange a vulnerabilidade Geoambiental, em que a primeira é marcada pela alta suscetibilidade a movimentos de massa e quedas de blocos e a segunda por uma alta suscetibilidade a erosão marinho-fluvial e poluição do lençol freático (SANTOS et al., 2006).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração dos MDT's foram considerados dois conjuntos de dados

topográficos resultantes de levantamento em escala 1:2.000 (Figura 3).

O primeiro composto de curvas de nível com equidistância de 1 metro (PMA, 2007) e o segundo uma “nuvem de pontos” obtida de um sistema LiDAR aerotransportado, utilizando o equipamento OPTECH 2050, fabricado no ano de 2002 com frequência do pulso laser de 50 kHz.

O LiDAR consiste em um aparato de emissão de um feixe *laser* até um determinado alvo, sendo que a operação se dá pela medida da

distância entre o emissor e o alvo, calculada pelo tempo necessário do retorno do sinal (ACKERMANN, 1996; KILLIAN et al. 1996; FLOOD; GUTELIUS, 1997). São utilizados para alvos verticais, construções e obras arquitetônicas e para varredura de superfícies (aerotransportados), havendo a possibilidade de integrar o levantamento à câmeras aerofotogramétricas (KERSTING, 2011), como realizado no presente trabalho.

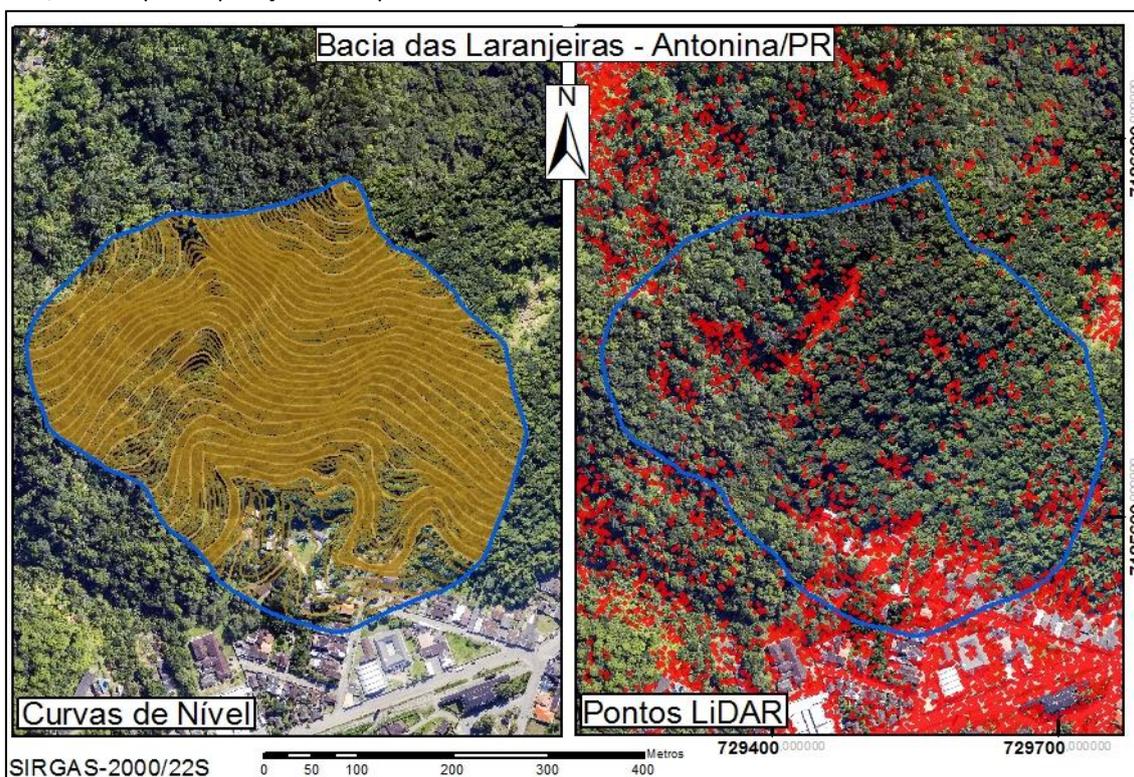


Figura 3 - Localização da Bacia Hidrográfica das Laranjeiras (BHL), com a distribuição das Curvas de Nível (1m) e dos Pontos LiDAR. Organização dos Autores.

O sistema aerotransportado varre a superfície orientado por um espelho oscilante no interior do equipamento, com um determinado ângulo máximo de abertura, cuja faixa de abrangência pode variar em função da altura de voo. Durante a operação, para cada ponto de contato do laser com uma superfície, é verificada a diferença de tempo entre a emissão e o retorno do sinal, permitindo assim a identificação dos valores x, y e z em um sistema de coordenada qualquer. Para que estes valores possam ser obtidos, um sistema GPS (*Global Positioning System*) está acoplado à aeronave e outro numa determinada base; soma-se a isto um sistema

(inercial), que associa um parâmetro de correção de deslocamento aos valores de coordenadas (ACKERMANN, 1996; KILLIAN *et al.*, 1996; FLOOD; GUTELIUS, 1997; BECKER; CENTENO, 2013).

Para a geração do MDT a partir dos dados LiDAR (MDT-LiDAR), foi necessário, inicialmente, aplicar uma ferramenta de filtragem da “nuvem de pontos” (originalmente em extensão *.las*), permitindo uma seleção de dados referente apenas às informações do terreno. Para isto, foi utilizado o conjunto de ferramentas *LAS Dataset*, disponível no programa *ArcGIS 10.3*. Essa ferramenta executa a filtragem da “nuvem de pontos” baseada na identidade de cada ponto,

conforme uma classificação definida por ASPRS (2014). Dessa forma, a ferramenta permite selecionar apenas os pontos correspondentes ao terreno (*ground*), separando-os daqueles que identificam o dossel florestal ou outros objetos sobre a superfície, por exemplo. Esta mesma ferramenta permite a adoção de um interpolador que, neste trabalho, foi adotado *Natural Neighbor* (NN), baseado no estudo realizado por Bater e Coops (2009). Esses autores avaliaram 48 MDT's gerados a partir de sete interpoladores para *grids* de distintas dimensões, variando entre 0,5, 1,0 e 1,5 metros e consideraram que NN foi o mais eficiente por apresentar o menor erro médio.

Para a elaboração do MDT baseado nas curvas de nível (MDT-Curvas), fez-se uso da ferramenta *Topo to raster* do programa *ArcGIS 10.3*, considerando sua eficiência conforme já identificada por Guimarães *et al.* (2003), Vieira e Ramos (2015) dentre outros, que utilizaram o modelo SHALSTAB, apoiados nesta ferramenta.

Os dados referentes às propriedades físicas do solo, massa específica (ρ_s), ângulo de atrito (θ), coesão (c') e profundidade (z), foram definidos a partir do trabalho de Lopes (2013). Neste, foi analisada uma sequência de amostras coletadas em duas trincheiras no interior de uma das cicatrizes de escorregamento no Morro do Bom Brinquedo (em uma área contígua a BHL). Diante da variação dos valores encontrada pelo autor, optou-se em considerar uma média simples para o ângulo de atrito e para a massa específica. Para a coesão, foram verificados os valores máximos e mínimos obtidos na amostragem, optando-se pelo menor valor (zero), encontrado a uma profundidade de 0,8m (LOPES, 2013), o que permitiu também associar um valor de profundidade. A adoção de um valor

zero para coesão encontra apoio na literatura, a exemplo de Guimarães *et al.* (2003), que trataram de avaliar a resposta do SHALSTAB em relação a variação destes dados. Desta forma definiu-se os seguintes valores: 2,6 g/cm³; θ : 31°; c' : 0 Pascal; z : 1 metro.

Os dois MDT's, gerados a partir de distintos dados, foram aplicados no modelo SHALSTAB, juntamente com os valores dos parâmetros do solo citados anteriores, para identificar, conforme já mencionado, a suscetibilidade potencial de ocorrência de escorregamentos translacionais rasos (Equação 1). Para esta operação foi considerada a versão do modelo aplicado em plataforma SIG, sendo que os resultados são expressos em sete classes de instabilidade (Quadro 1), dados pela razão entre pluviosidade (q) e transmissividade (T) (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

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

Na qual:

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/s²]

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]

Quadro 1 - Relação entre o resultado da fórmula do modelo para cada classe de estabilidade de cada célula no *grid*.

CLASSE DE ESTABILIDADE	CONDIÇÃO
(A) Incondicionalmente estável e saturado	$a/b > (T/Q)\text{sen}\theta$ e $\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$
(B) Incondicionalmente estável e não saturado. (Log $q/T > -2.2$)	$a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$ e $\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$

(C) Estável e não saturado (Log q/T -2.5 _ -2.2)	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $a/b < (T/Q)\text{sen}\theta \text{ e } \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$
(D) Instável e não saturado (Log q/T -2.8 _ -2.5)	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $a/b < (T/Q)\text{sen}\theta \text{ e } \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$
(E) Instável e saturado (Log q/T -3.1 _ -2.8)	$\frac{a}{b} > \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{T}{Q} \text{sen}\theta$ $a/b > (T/Q)\text{sen}\theta \text{ e } \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$
(F) Incondicionalmente instável e não saturado. (Log q/T < -3.1)	$\tan\theta > \tan\phi \text{ e } a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$
(G) Incondicionalmente instável e saturado	$\tan\theta > \tan\phi \text{ e } a/b > (T/Q)\text{sen}\theta$

Fonte: Modificado de Dietrich e Montgomery (1998).

Após a geração dos dois cenários (MDT-Curvas e MDT-LiDAR), os mesmos foram comparados com o mapa de cicatrizes proposto por Martins (2016), que realizou uma análise dos dados da MINEROPAR (2013) e Martins *et al.* (2015), apoiado também em visitas de campo. Assim foram obtidos, baseados na proposta de Gao (1993), os índices de Concentração de Cicatrizes (CC), dado pela razão entre o número de células, de cada classe afetada pelas cicatrizes, e o total de células da bacia; e o Potencial de Escorregamentos (PE), dado pela razão entre o número de células, de cada classe, afetadas pelas cicatrizes e o total de células dessa mesma classe.

Para fins de realizar as análises dos índices CC e PE foram obtido também os

percentuais de Frequência de Classes (F) de instabilidade ocorridas no interior da bacia. Finalmente foram analisadas as respostas do modelo em relação à origem dos dados do MDT, permitindo identificar o MDT com reposta mais eficiente na definição das classes de instabilidades.

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os mapas de suscetibilidade a escorregamentos gerados pelo SHALSTAB, baseados nos dois distintos conjuntos de dados para a geração dos MDT's, são apresentados na Figura 4 e a distribuição dos percentuais F e dos índices CC e PE nas Figuras 5 e 6.

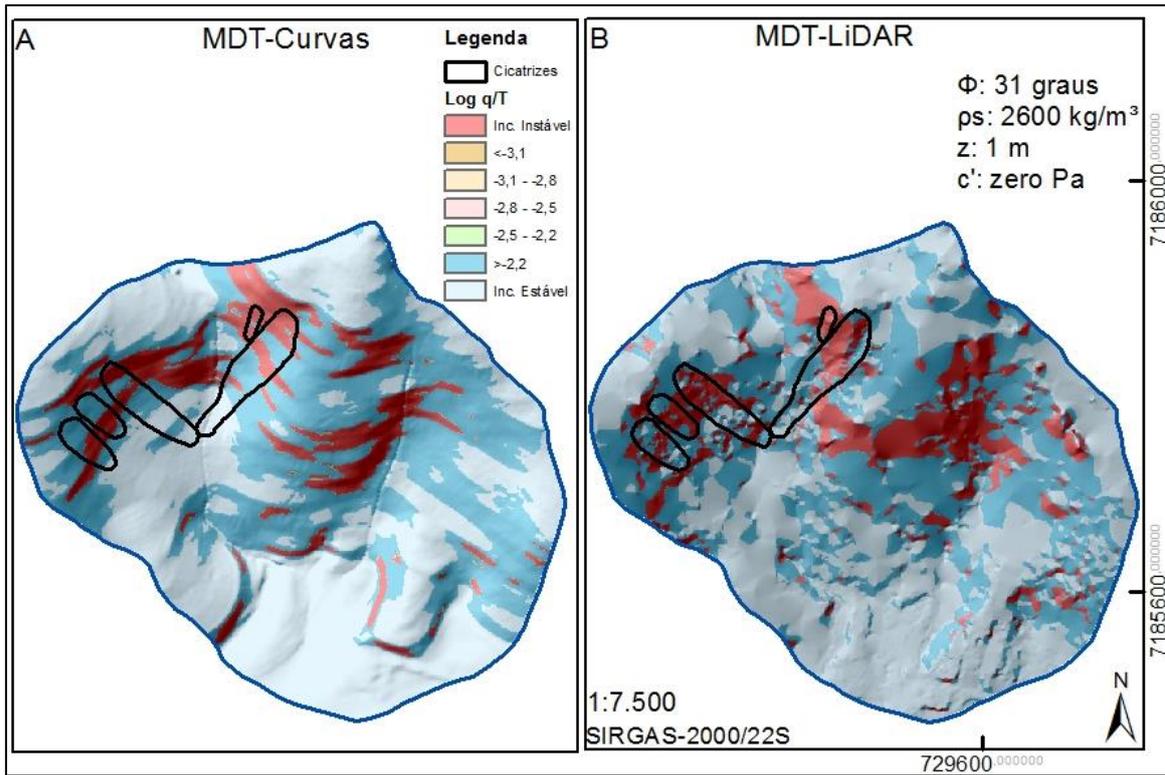


Figura 4 - Mapas de Suscetibilidade a escorregamentos gerados pelo SHALSTAB: A) resultado baseado no MDT-Curvas e B) resultado baseado no MDT-LiDAR. Organização dos Autores.

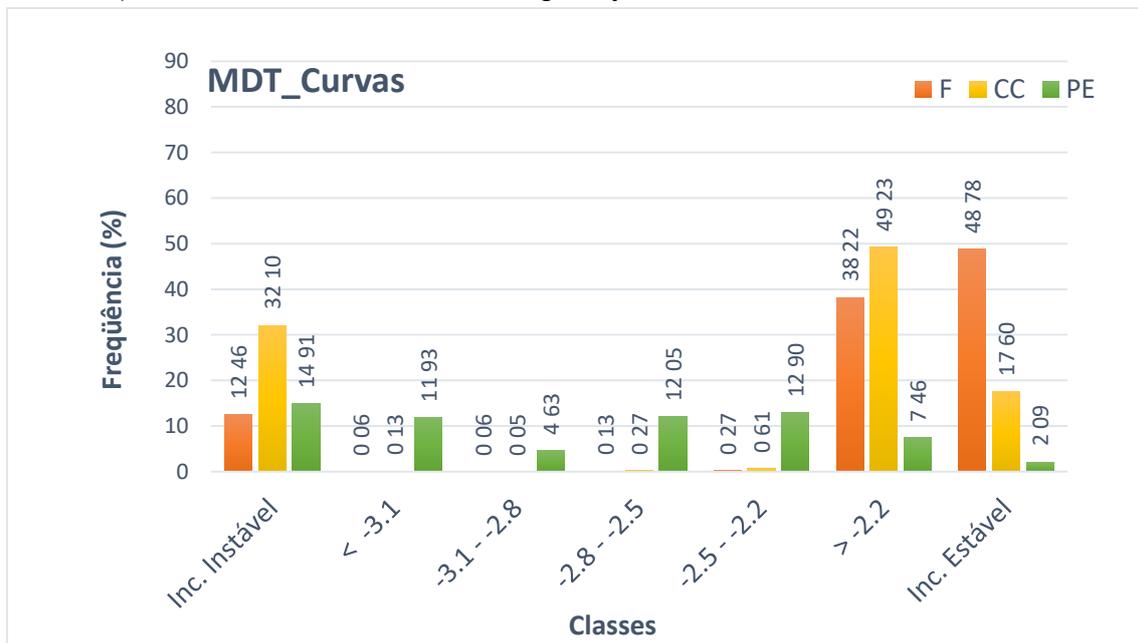


Figura 5 - Distribuição de Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Escorregamentos (PE) para o MDT-Curvas. Fonte: Organização dos Autores.

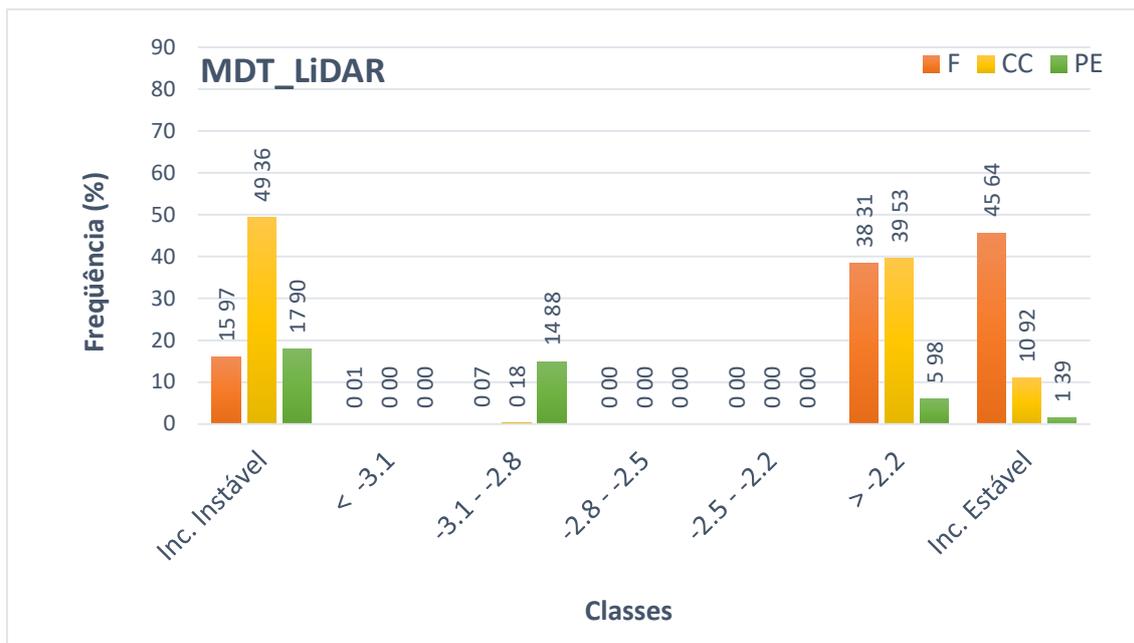


Figura 6 - Distribuição Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Escorregamentos (PE) para o MDT-Lidar. Fonte: Organização dos Autores.

Usando o MDT-Curvas (Figura 4A e Figura 5) o modelo classificou ~13% da bacia como Incondicionalmente Instável e 38% nas duas mais estáveis, a classe $\text{Log } q/T > -2,2$ e 49% e a Incondicionalmente Estável. As quatro classes intermediárias somadas registraram menos de 1%. A Concentração de Cicatrizes (CC) variou de 32% para a classe Incondicionalmente Instável até 66% para as duas classes mais estáveis. O Potencial de Escorregamento (PE) registrou 15% para a classe mais instável e 9% para as duas mais estáveis. As quatro demais variaram de 4 a 12%.

Considerando o MDT-LiDAR (Figura 4B e Figura 6), ~16% da bacia foi classificada como Incondicionalmente Instável, e, aproximadamente 50% das cicatrizes (CC) ocorreram nesta mesma classe. Conjuntamente, as classes mais estáveis ($\text{Log } q/T > -2,2$ e Incondicionalmente Estável) registraram 84% de Frequência e 50% das cicatrizes ficaram concentradas nestas duas classes. Valores nulos foram registrados em algumas das classes, considerando a Frequência. Quanto ao PE, a classe Incondicionalmente Instável registrou 18%, e, das quatro classes intermediárias, apenas a $\text{Log } q/T$ entre -3,1 e -2,8 registrou algum valor (~15%). As duas classes mais estáveis marcaram menos de 8% juntas.

Baseado nos resultados apresentados pelos dois cenários nota-se que o MDT-Curvas registrou valores para todas as sete classes, enquanto que o MDT-LiDAR mostrou valor nulo para algumas das classes intermediárias. Contrariamente, o MDT-LiDAR registrou os mais altos valores para o CC na classe mais instável. Em suma, o MDT-Curvas registrou menores valores para a classe Incondicionalmente Instável quando comparado ao MDT-LiDAR, e maiores valores para as duas classes mais estáveis, em CC. As quatro classes intermediárias não aparecem em ambos os mapas, mesmo quando registram valores, devido ao reduzido número de células nestas classes.

Ambos os MDT's registraram altos valores em PE (14,91% e 17,90%) para a classe Incondicionalmente Instável. A maior ocorrência desta classe se deu ao longo dos trechos médios e superiores das vertentes, nos dois cenários. É importante destacar que o MDT-Curvas suavizou as zonas de maior suscetibilidade, e o MDT-LiDAR, aparentemente, marcou melhor a área afetada pelo escorregamento. Este fato pode ser explicado devido ao período de coleta dos dados LiDAR, que se deu 2 anos após o evento, e alguma das cicatrizes ainda são visíveis,

sobremaneira àquelas que concentram altos valores de CC.

Aproximadamente 49% das cicatrizes se concentraram na classe Incondicionalmente Instável para o MDT-LiDAR, em oposição a 32% do MDT-Curvas. Contudo, estes percentuais, exclusivamente, não podem atestar que o MDT-LiDAR trouxe resultados mais eficientes em relação ao MDT-Curvas, pois houve uma concentração maior de pontos do LiDAR nas áreas afetadas, devido à ausência de vegetação durante o aerolevanteamento, favorecendo uma melhor representação da topografia nestes setores das bacias. Este fato é de suma importância, pois na representação topográfica por meio de curvas de nível, não são contempladas estas feições. Logo, é justo assumir que ambos os conjuntos de dados para a geração dos MDT's representaram similarmente o relevo, considerando a Frequência das classes do modelo, bem como sua distribuição ao longo da bacia.

Aventa-se que os baixos valores, ou mesmo nulos, nas classes intermediárias em ambos os MDT's, podem ser explicados pela morfologia das vertentes, que de acordo com a literatura (MINEROPAR, 2013) não são predominantemente côncavas. Em outras palavras, as feições das vertentes que poderiam ser registradas nestas classes intermediárias de instabilidade, não foram representativas.

O uso de MDT's derivados do LiDAR tem sido amplamente discutido na literatura e os resultados tendem a variar, especialmente, devido a densidade de pontos e à complexidade do terreno (LIU, 2008). Trabalhos prévios mencionam a precisão e acurácia dos pontos LiDAR (considerando o mesmo equipamento usado aqui) identificando um erro de 15 cm para a altimetria, sendo este mais sistemático sob densa vegetação (BECKER; CENTENO, 2013). Portanto, como no caso de outros dados de sensores remotos, um MDT-LiDAR pode apresentar certas limitações em usos específicos, como modelagem hidrológica (BARBER; SHORTRIDGE, 2005), ou, como destacado no presente trabalho, no mapeamento de

suscetibilidade a escorregamentos usando modelos de base física.

Em específico, para a BHL, o número de pontos por metro quadrado diferiu enormemente da literatura. Após o processo de filtragem, obteve-se 0,06 pt/mt² (ponto por metro quadrado), de pontos no terreno da bacia. Demais trabalhos obtiveram valores próximos de 2 pt/mt² (BATER; COOPS, 2009; GUO *et al.*, 2010). Esta diferença pode ser associada, primeiramente, à densidade do dossel florestal, que neste caso, pode inibir uma maior penetração do *laser* e, por consequência, uma menor quantidade de pontos alcançam o terreno e, também, diante da não adoção de parâmetros específicos durante a operação de obtenção dos dados, como recobrimentos em menor altura de voo e o uso de equipamentos com maior poder no feixe *laser*.

Cabe assumir, portanto, que em face da inexistência de um levantamento com alta densidade de pontos, que, por conseguinte permitiria a geração de um MDT de alta resolução, a utilização de curvas de nível se mostra como uma opção viável e adequada. Esta afirmação é apoiada no trabalho de Hopkinson *et al.* (2009), que alegam que diante da necessidade de um trabalho em escala 1:25.000, o MDT gerado a partir de curvas de nível será o mais adequado, considerando o custo/benefício.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa aqui proposta verificou a influência de distintos dados topográficos (curvas de nível e dados LiDAR) para a elaboração de MDT's nas respostas do modelo matemático de base física SHALSTAB. Os resultados mostraram que houve significativa diferença no índice de Concentração de Cicatrizes, porém o mesmo não se repetiu no Potencial de Escorregamentos, assim como na Frequência das classes. Além disto, a ocorrência da classe mais instável foi similar em ambos os cenários, sendo que no MDT-Curvas as zonas de maior suscetibilidade foram suavizadas, enquanto que o MDT-LiDAR, aparentemente, marcou melhor a área afetada pelo escorregamento, devido ao momento de coleta destes dados, posterior ao

escorregamento, mas ainda com cicatrizes preservadas.

Cabe destacar que MDT's gerados de dados LiDAR são amplamente tratados na literatura e suas respostas mostram-se eficientes em diversas análises, porém a densidade de pontos obtidas no levantamento determina a qualidade do MDT. Deste modo, a definição de parâmetros prévios de densidade de pontos deve ser considerada para a utilização desses dados em análises apoiadas em um MDT. Em outras palavras, a utilização de dados LiDAR gerados para diferentes fins, ou aqueles que apenas complementam um levantamento aerofotogramétrico, não garantem a geração de MDT's consistentes quando, por exemplo, na aplicação de modelos que avaliam fluxos hidrológicos ou a área de contribuição.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo financiamento do trabalho (Processo BEX 5188/14-8) e também aos revisores do periódico, pelos comentários e sugestões. Também externam sua gratidão aos colegas do PPGF/UFPR, do GPMorfo, ao Prof. Dr. Claudinei Tabora da Silveira (UFPR), Dr^a. Lupamudra Dasgupta (UW) e a Harvey Greenberg do GIsLAB (UW).

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, F. Airborne Laser Scanning for Elevation Model. **GIM International Journal of Geomatics**, Vol 10. P. 24-25. 1996.

ASPRS. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. **Superseded ASPRS LAS 1.0 Format Standard**, May 9. 2003. Disponível em: <<http://www.asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html>>. Acesso em: 25 de novembro de 2014.

BARBER, C. T.; SHORTRIDGE, A. Lidar elevation data for surface hydrologic modeling: Resolution and representation issues. **Cartography and Geographic Information Science**, 32(4):401-410.2005. DOI:10.1559/152304005775194692

BATER, W.B.; COOPS, N.C. Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. **Computer & Geosciences**. v. 35. p. 289-300. 2009. DOI: 10.1016/j.cageo.2008.09.001

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. Regional Landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. **Landslides 2**: pp. 266-279. 2005.

BECKER, J.H.; CENTENO, J.A.S. Avaliação de Métodos de Filtragem de Nuvem de Pontos Derivados do Sistema Laser Scanner Aerotransportado para Obtenção de MDT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 4 N. 65. pp. 651-659. 2013.

CAVALCANTI, R.C.; TAVARES JUNIOR, J.R.; CANDEIAS, A.L.B. Simulação de Mapeamento de Riscos de Inundações Usando Dados LiDAR: Estudo de Caso da Bacia do Rio Una – PE. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 65/4: 703-716. 2013.

CHORLEY, R. J. Models in Geomorphology. In: CHORLEY, R.J. e HAGGETT, P. (eds.). **Models in Geography**. Methuen e Co., Londres.43-96p. 1967.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R., SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. In: **National Council for Air and Stream Improvement**, 1998.

ESRI. ArcGis, Spatial Analyst, 3D Analyst. versão 10.3. **Environmental Systems Research Institute**, 2015.

FLOOD, M.; GUTELIUS, B. Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar. **Photogrammetry Engineering and Remote Sensing**. LXIII, 327–29; 363–66. 1997.

GAO, J. Identification of Topographic Settings Conductive to Landsliding From Nelson County, Virginia, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, 579-591. 1993.

GLENN, N.F.; STREUTKER, D.R.; CHADWICK, D.J.; THACKRAY, G.D.; DORSCH, S.J. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. **Geomorphology**, 73. pp 131–148. 2006. DOI:10.1016/j.geomorph.2005.07.006

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, 2003. DOI:10.1016/S0013-7952(02)00263-6
- GUO, Q.; LI, W.; YU, H.; ALVAREZ, O. Effects of Topographic Variability and Lidar Sampling Density on Several DEM Interpolation Methods. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. V. 76 (6). P. 1-12. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.76.6.701>
- GUZZETTI, F.; MONDINI, A.C.; CARDINALI, M.; FIORUCCI, F.; SANTANGELO, M.; CHANG, K.T.; Landslide inventory maps: New tools for an old problem. **Earth-Science Reviews**, 112: 42-66. 2012. DOI:10.1016/j.earscirev.2012.02.001
- KILLIAN, J.; HAALA, N.; ENGLISH, M. Capture and Evaluation of Airborne Laser Data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 31. N.3. ISPRS, Vienna, Austria. Pp. 383-388. 1996.
- KERSTING, A.P.B. Quality Assurance of Multi-Sensor System. 295p. **Tese** (Doutorado em Engenharia Geomática) – School of Engineering, University of Calgary, 2011.
- HOPKINSON, C.; MASAKI HAYASHI, M.; PEDDLE, D. Comparing alpine watershed attributes from LiDAR, Photogrammetric, and Contour-based Digital Elevation Models. **Hydrological Process**. 23, 451–463. 2009. DOI: 10.1002/hyp.7155
- LIU, X. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. **Progress in Physical Geography**, v. 32(1), p. 31-49. 2008. DOI: 10.1177/0309133308089496
- LOPES, F.C.A. Avaliação da Influência da Distribuição Espacial da Espessura do Solo e do Nível Freático na Estabilidade de Encosta. 126p. **Dissertação** (Mestrado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2013.
- MARTINS, T.D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B.C. Mapeamento de cicatrizes de escorregamentos utilizando imagem multiespectral. **Revista do Departamento de Geografia**, v.30. pp. 96-109. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/rdg.v30i0.98779>
- MARTINS, T.D. Análise de Modelos Digitais de Terreno na Identificação de Áreas Suscetíveis a Escorregamentos Rasos. **Tese** (Doutorado em Geografia). Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 148f. 2016.
- MICHEL, G.P.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R.F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**. 2014. DOI 10.1007/s11368-014-0886-4
- 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**, v30: 153-1171. 1994.
- MONTGOMERY, D. R., SULLIVAN, K.; GREENBERG, M. H. Regional Test of a Model for Shallow Landsliding. **Hydrological Process**, v. 12. p.943-955. 1998.
- 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.
- PMA. Prefeitura Municipal de Antonina. **Plano Diretor Municipal**. 2007.
- RAZAK, K.A.; SANTANGELO, M.; VAN WESTEN, C.J.; STRAATSMA, M.W.; JONG, S.M. Generating an optimal DTM from airborne laser scanning data for landslide mapping in a tropical forest environment. **Geomorphology**, 190. pp 112–125. 2013. DOI:10.1016/j.geomorph.2013.02.021
- SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALI N E, FIORI A P, SILVEIRA, C. T.; SILVA, J. M. F.; ROSS, J. L. S.; Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.7, n.2, p. 3-11, 2006.
- SCHULZ, W.H. Landslides mapped using LIDAR imagery, Seattle, Washington. **U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1396**. 11p. 2004.
- SCHULZ, W.H. Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. **Engineering Geology**, n 89. p. 67–87. 2007. DOI:10.1016/j.enggeo.2006.09.019
- TOPODATA. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: Janeiro de 2015.

VIEIRA, B.C.; RAMOS, H. Aplicação do Modelo SHALSTAB para Mapeamento da Suscetibilidade a Escorregamentos Rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, v29, p. 161-174. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/rdg.v29i0.102087>

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.