



Metodologia para o cálculo de volumes de deslizamentos de terras de dimensões variáveis. O exemplo da Ilha da Madeira.

Magda Paraíso MATIAS¹, Ana Paula FALCÃO², Alexandre GONÇALVES², Pedro PINA¹, Sandra HELENO¹, António Jorge de SOUSA¹

¹ Cerena, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

² CERis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

(magda.matias@tecnico.ulisboa.pt, ana.p.falcao@tecnico.ulisboa.pt, alexandre.goncalves@tecnico.ulisboa.pt, ppina@tecnico.ulisboa.pt, sandra.helena@tecnico.ulisboa.pt, ajsousa@tecnico.ulisboa.pt)

Palavras-chave: Deslizamentos de terras, cálculo de volumes, módulo ENVI DEM Extraction

Resumo: Os deslizamentos de terra são fenómenos naturais normalmente associados a fatores como precipitação intensa, sismos ou erupções e, de acordo com a U.S. Geological Survey, causam milhares de mortes por todo o Mundo, com prejuízos materiais avultados. Em 2010, só em Portugal Continental ocorreram 648 deslizamentos, e na Ilha da Madeira, a 20 de fevereiro, este número ascendeu a milhares num só evento, sendo esta a área de estudo. Os casos mais abordados na literatura reportam-se ao estudo e cálculo de volumes de movimentos de massa de grandes dimensões. Porém, no caso do evento ocorrido na Ilha da Madeira, tornou-se necessário desenvolver uma metodologia assistida que permitisse calcular os volumes, dado que as dimensões dos deslizamentos são muito variáveis. A metodologia tem por base a comparação entre modelos digitais de terreno (MDT) relativos ao evento, respetivamente 2007 e 2010. Face às características dos deslizamentos e ao valor da equidistância natural da cartografia de 2010, foi necessário reconstruir o MDT que refletisse as alterações morfológicas no interior das cicatrizes, com base em pares de fotografias e recorrendo ao software DEM da ENVI.

Os resultados revelaram-se promissores, quando comparados com os valores da profundidade média recolhidos *in situ*, em pontos homoganeamente distribuídos pela área de trabalho. A metodologia revelou-se adequada em situações complexas, onde o número e as dimensões dos deslizamentos inviabilizam metodologias mais globais.



1. Introdução

Os deslizamentos são um fenómeno natural complexo, caracterizado por movimentos de material sólido em zonas de vertente. Este risco natural, desencadeado principalmente por chuva intensa, sismos e degelo rápido de neve, pode causar perdas humanas e danos significativos em infraestruturas, e uma preocupação permanente nas muitas regiões do globo onde a sua extensão e frequência são elevadas. Os eventos mais frequentes são geralmente caracterizados por um número reduzido de deslizamentos embora de grandes dimensões e diversos autores (Tsutsui *et al.*, 2007; Booth *et al.*, 2009; Martha *et al.*, 2010a) propõem metodologias de cálculo dos volumes com base na análise de imagens de satélite SPOT-5 e Cartosat-1 pré e pós-evento com bons resultados em áreas pouco declivosas, ou o uso de modelos digitais de terreno, em áreas restritas, adquiridos por LIDAR.

O evento ocorrido a 20 de fevereiro de 2010 na Ilha da Madeira caracteriza-se por um número muito elevado de deslizamentos (aproximadamente 8000 nos concelhos da Ribeira Brava e do Funchal) mas de reduzidas dimensões (Figura 1), dificultando a automatização do cálculo dos volumes, pelo que foi necessário recorrer a uma metodologia alternativa com base em pares estereoscópicos de fotografias aéreas adquiridas após o evento.

No presente artigo pretende-se apresentar sucintamente a metodologia que permitiu a reconstrução detalhada do modelo digital do terreno no interior das cicatrizes dos deslizamentos e os resultados obtidos. Estes resultados encontram-se na gama expectável de valores (relativos à profundidade média e área das cicatrizes dos deslizamentos) obtidos para o mesmo evento em estudos anteriores (Lira *et al.*, 2013).

A metodologia apresentada insere-se no âmbito da Tarefa 4 “Volume estimation” do projeto AULIS - Inventariação automática de deslizamentos com base em imagens de elevada resolução espacial - financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

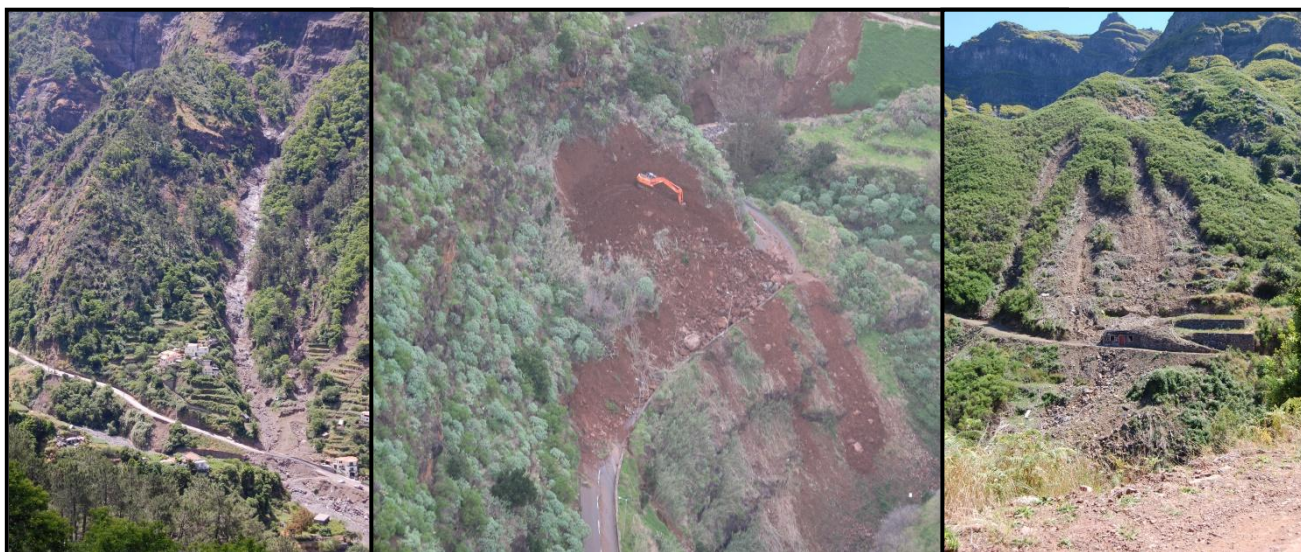


Figura 1 – Exemplos de deslizamentos de terra que ocorreram durante o evento de fevereiro de 2010

2. Enquadramento

2.1 Caso de Estudo

A área considerada neste estudo é relativa a uma zona na Ilha da Madeira (Figura 2), onde por consequência de um evento extremo de precipitação – no período 6:00H-11:00H, a estação do Funchal registou 108 mm e a estação do Pico do Areeiro registou 146 mm, aproximadamente o dobro dos valores relativos às médias mensais – ocorreram muitos deslizamentos que causaram elevados prejuízos materiais e vitimaram 42 pessoas. As áreas mais afetadas foram os municípios da Ribeira Brava e do Funchal, com todo o centro histórico do Funchal completamente inundado.

As dimensões da área selecionada para a apresentação da metodologia são aproximadamente 0,6 km x 0,8 km.

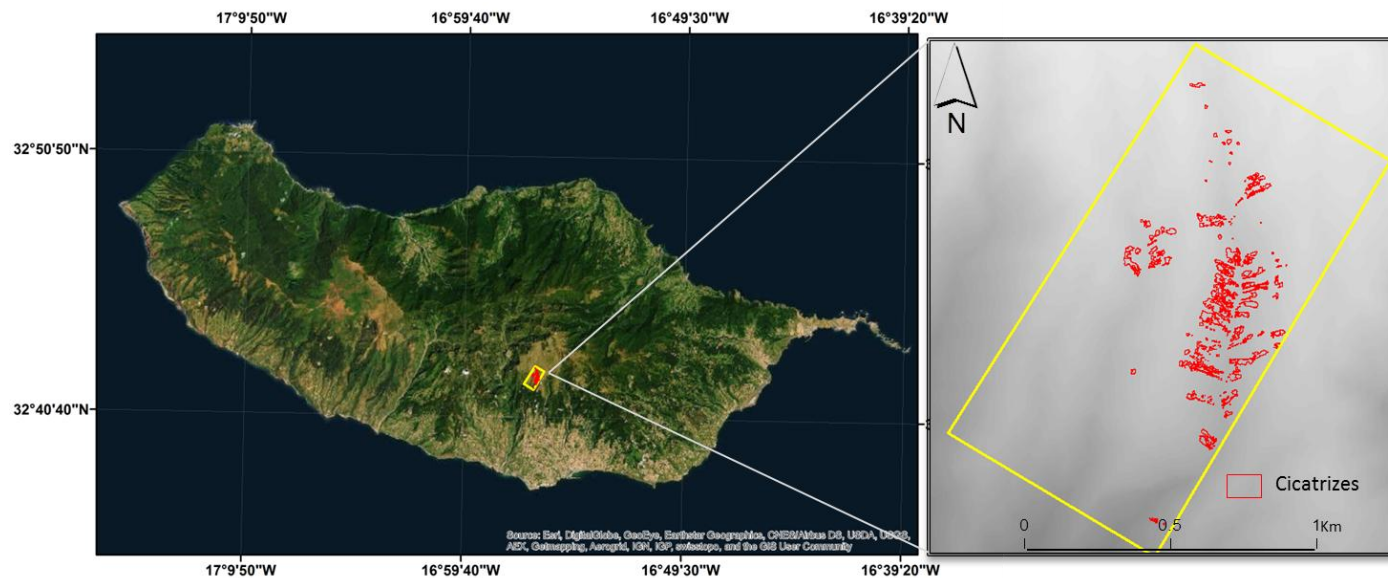


Figura 2 – Modelo digital do terreno relativo à Ilha da Madeira e identificação das bacias hidrográficas dos dois concelhos mais afetados pelo evento de 20 de fevereiro de 2010 (Lira *et al.*, 2013)

2.2 Informação de base

A informação de base utilizada para a realização deste trabalho incluiu a utilização de:

- Imagens Geoeye – 1 multiespectrais de elevada resolução espacial e adquiridas após o evento de fevereiro – 23 e 28 de fevereiro (bandas R-G-B-NIR com resolução espacial de 2m/pixel pancromático com 0,5m/pixel);
- Ortofotomapas pré (2007) e pós-evento (2010) cedidos pela DSIGC, com bandas RGB e 0,4 m de resolução espacial;
- Modelo digital de terreno de 2007 obtido por fotogrametria com 10 m de resolução espacial (cedido pela DSIGC);
- Fotografias aéreas adquiridas com 30 cm de resolução, com o objetivo de construção de um modelo altimétrico relativo com base em pares estereoscópicos no software ENVI;
- Inventário de dados geométricos de cicatrizes (limites de deslizamentos) ocorridos no evento de fevereiro de 2010, resultantes do projeto PEDAM (2010-2011).

3. Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho teve por base o uso de imagens Geoeye-1, para identificação dos deslizamentos ocorridos no evento, e de um modelo digital do terreno obtido por processos fotogramétricos em 2007 com 10 m de resolução espacial. Embora se dispusesse de um modelo digital do terreno posterior ao evento (resolução de 5 m), a reduzida dimensão das cicatrizes de deslizamento inviabilizou a sua utilização pelo que foi necessário reconstruir no interior das cicatrizes o modelo digital do terreno com células de dimensão de 30 cm, de modo a ser compatibilizado com o modelo altimétrico produzido com base em fotografia aérea (com 30 cm de resolução espacial) no módulo DEM Extraction do software ENVI., obtendo-se um modelo relativo. Os principais passos da metodologia foram:

- Identificação das cicatrizes por processos automáticos de reconhecimento de padrão;
- Obtenção da superfície com as diferenças altimétricas entre o modelo pré-evento e o modelo relativo obtido no software ENVI, para posterior utilização dessas diferenças no passo seguinte;



- Reconstrução da morfologia no interior das cicatrizes, através da geração de 50 000 pontos distribuídos nas envolventes de 5 m a cada cicatriz, e de uma interpolação do tipo inverse distance weighted com base nas diferenças encontradas no passo anterior (admissível dada a grande quantidade de pontos considerada);
- Cálculo do volume por comparação entre o modelo digital do terreno anterior ao evento (reamostrado para células de 30 cm de resolução) e um modelo altimétrico obtido pela soma de valores entre o modelo relativo e a distribuição obtida no passo anterior.

3.1 Identificação das cicatrizes de deslizamento

Foi usado um método semi-automático na identificação e mapeamento das cicatrizes, que consistiu numa fase de segmentação em que são delineadas as estruturas ou objetos existentes nas imagens (Figura 3), para serem de seguida classificados em duas classes (deslizamento e não-deslizamento) por intermédio de um conjunto de características descritivas do objeto, de natureza espectral, textural e espacial. A segmentação da imagem em objetos foi realizada com o módulo ENVI Feature Extraction (cuja segmentação se baseia na deteção de contornos, ou “edge-based”, utilizando o algoritmo “watershed”). Foram tentados diferentes parâmetros para controlar a homogeneidade dos pixéis dentro das regiões segmentadas, tendo-se finalmente optado por dar prioridade à precisão no delineamento dos contornos dos deslizamentos, aceitando o custo de uma relativa sobressegmentação da imagem (scale 30, merge 90).

Testaram-se dois procedimentos distintos de classificação: baseada em pixéis e baseada em objetos, tendo esta última sido escolhida para o trabalho, pela vantagem de se poder utilizar atributos espaciais e texturais na classificação, e por ter superado em desempenho todas as classificações baseadas em pixéis. O conjunto de treino foi obtido de forma aleatória a partir de inventário prévio de deslizamentos numa área limitada da imagem. De seguida, a totalidade da imagem foi classificada utilizando diferentes algoritmos de aprendizagem, tendo finalmente sido escolhido, pelo melhor desempenho, o Support Vector Machine. As imagens GeosEye-1, adquiridas 3 dias após o evento de fevereiro de 2010, foram usadas como entrada para o classificador, especificamente as 4 bandas RGB-NIR (com resolução de 0,5 m após fusão com a banda PAN). A informação utilizada pelo classificador inclui também um índice de vegetação calculado a partir das bandas R e NIR (NDVI), índices topográficos relevantes derivados de um MDT com 4 m de resolução, assim como características texturais e morfológicas.

3.2 Construção do modelo digital do terreno (MDT2010 – 30 cm)

A reconstrução do modelo digital do terreno após o evento foi possível utilizando pares de fotografias aéreas. Para tal foi necessário primeiramente gerar as correspondentes imagens epipolares, a partir das quais foram descritos os constrangimentos geométricos entre as duas imagens de um par estereoscópico. O passo seguinte consistiu na combinação das imagens para a área de sobreposição, através da identificação automática de pontos comuns às duas imagens por correlação cruzada, numa imagem onde em cada célula foi armazenado o valor da paralaxe (ao longo da linha epipolar) permitindo a recuperação das alturas dos pontos em valores relativos. Finalmente o modelo digital do terreno com resolução de 30 cm (MDT 30cm) foi reprojetoado e georreferenciado, em planimetria, de acordo com o pretendido. Em termos altimétricos o processo revelou-se bastante ineficaz pelo que foi necessária uma correção adicional que consistiu na identificação da diferença altimétrica entre o MDT 30cm e o MDT 10m em pontos exteriores aos limites dos deslizamentos (área de proteção de 5 m em torno das cicatrizes, de acordo com a Figura 4).

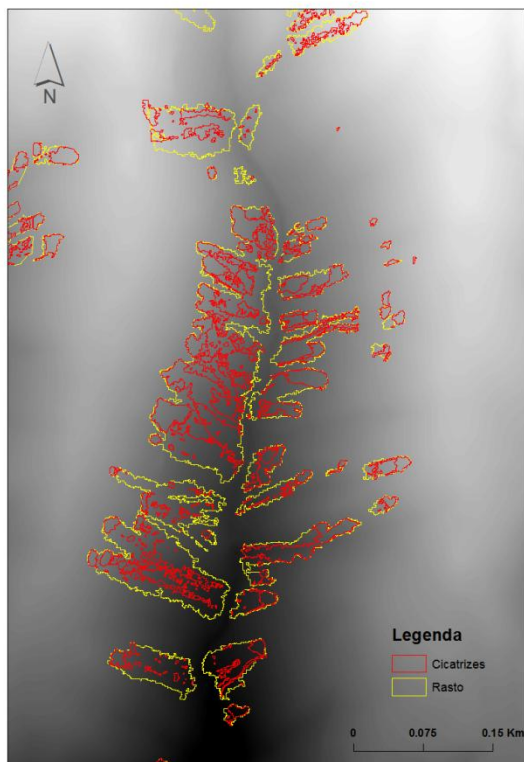


Figura 3 – Identificação das cicatrizes e dos rastros para os deslizamentos mapeados na área de trabalho

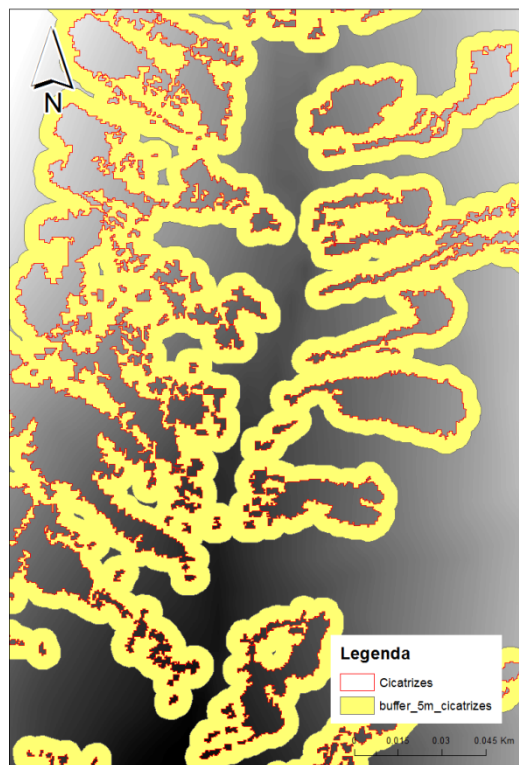


Figura 4 – Áreas de proteção em torno das cicatrizes

3.3 Cálculo do volume

No interior das cicatrizes mapeadas o cálculo do volume foi determinado a partir das diferenças entre o modelo pré-evento (2007) reamostrado em células de dimensão 30 cm e o modelo digital do terreno obtido no passo anterior (MDT 30cm). Os resultados finais estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Resultados relativos ao cálculo de volumes para a área identificada

Indicadores	MDT2007 – MDT2010
Profundidade média (m)	0,54
Área máxima das cicatrizes (m ²)	1678,50
Área mínima das cicatrizes (m ²)	0,27
Volume máximo (m ³)	25694,43
Volume mínimo (m ³)	-4848,24
Somatório dos volumes (m ³)	-37842,35
Volume de escavação (m ³)	-67878,09
Volume de aterro (m ³)	+ 30035,74



Os valores obtidos encontram-se no intervalo de valores de profundidade e extensão das cicatrizes nos concelhos de Ribeira Brava e Funchal para os quais existe validação com dados de levantamentos topográficos, ou seja, comparando a profundidade média obtida pelo procedimento do cálculo de volumes com valores recolhidos em campo (Lira *et al*, 2013). Numa fase seguinte do presente trabalho, os resultados obtidos poderão ser validados do mesmo modo.

4. Conclusões

A metodologia apresentada neste artigo revelou-se bastante adequada no cálculo de volumes, numa situação que não é frequentemente abordada em literatura pela dificuldade de trabalhar com um conjunto muito denso de cicatrizes, mas de pequena dimensão.

Futuramente esta metodologia será estendida aos concelhos da Ribeira Brava e Funchal. A fase de validação deverá envolver a recolha de dados em campo relativos à área, profundidade e caracterização geométrica das cicatrizes originadas pelos deslizamentos de terra.

Agradecimentos

Este estudo foi realizado ao abrigo do projeto financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) - AULIS - Inventariação automática de deslizamentos com base em imagens de elevada resolução espacial (PTDC/ECM/116611/2010).

Um agradecimento adicional é devido aos serviços da extinta Secretaria Regional de Equipamento Social da Madeira, e à Direção de Serviços de Informação Geográfica e Cadastro integrada na Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais.

Referências Bibliográficas

Booth A.M., Roering J.J., Perron J.T. (2009). Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology*, 109(3-4), Págs. 132-147.

Lira, C.; Lousada, M.; Falcão, A.P.; Gonçalves, A.B.; Heleno, S.; Matias, M.; Pereira, M.J.; Pina, P.; Sousa, A.J.; Oliveira, R.; Almeida, A.B., (2013). The 20 February 2010 Madeira Island flash-floods: VHR satellite imagery processing in support of landslide inventory and sediment budget assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), Págs. 709-719. doi: 10.5194/nhess-13-709-2013

Martha T.R., Kerle N., Jetten V., van Westen C.J., Kumar K.V., (2010). Landslide volumetric analysis using Cartosat-1-derived DEMs. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(3), Págs. 582-586.

Tsutsui K., Rokugawa S., Nakagawa H., Miyazaki S., Cheng C.T., Shiraishi T., Yang S.D., (2007). Detection and volume estimation of large-scale landslides based on elevation- change analysis using DEMs extracted from high-resolution satellite stereo imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6): 1681.