

Análise sensitiva dos factores condicionantes da avaliação da susceptibilidade a deslizamentos em Santa Marta de Penaguião (Vale do Douro – Portugal)

Sensitivity analysis of conditioning factors for landslide susceptibility evaluation in Santa Marta de Penaguião (Douro valley – Portugal)

S. Pereira^{1,2}, J. L. Zêzere¹, C. Bateira²

¹Riskam – Avaliação e gestão de perigosidades e risco ambiental, Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa

²Dynat - Dinâmicas Ambientais, Modelação, Avaliação e Cartografia, Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território

Abstract

The municipality of Santa Marta de Penaguião (70 square kilometres) is one of the test sites of the project Maprisk. The study area has been affected in recent years by destructive landslides that were responsible for deaths and house and roads destruction. The study area is characterized by a transition landscape between the Marão mountain and the Douro valley, with deep incised valleys, tectonic depressions and slopes controlled by the geological structure. This landscape is characterised by the vineyard monoculture cultivated in agricultural terraces over centuries. There are historical records of destructive landslides, although they were aggregated in a landslide geodatabase only recently. The most complete landslide inventory was performed in 2005, 2008 and 2009 and includes 859 landslides, most of shallow translational slide type (80% of total). Using the information value method, a sensitivity analysis was performed to identify the most important conditioning factors (8 spatial thematic layers) concerning the spatial distribution of shallow translational slides. Land use, terrace structures build in slopes and slope aspect are the landslide conditioning factors that show the highest success rates. Susceptibility maps produced with different number of conditioning factors were tested and good results were achieved using only 3 factors. The results must be carefully analysed, because they result from few inventories and the land use changes rapidly in order to get more space for vineyard plantations. In addition, the slope structures that sustained the soil erosion have been replaced for slopes without soil support structures.

Keywords

Landslides; Information Value; Sensitivity Analysis; Douro Valley; Maprisk

Resumo

O município de Santa Marta de Penaguião (70 km²) é uma das áreas-amostra do projecto Maprisk. A área de estudo foi afectada recentemente por movimentos de vertente destrutivos, que foram responsáveis por mortes e destruição de casas e estradas. A área de estudo é caracterizada por uma paisagem de transição entre a Serra do Marão e o vale do Douro, com vales fortemente encaixados, depressões tectónicas e vertentes controladas pela estrutura geológica. Esta paisagem é caracterizada pela monocultura da vinha em terraços agrícolas ao longo dos séculos. Existem registos históricos de movimentos de vertente destrutivos, contudo apenas recentemente foram integrados numa base de dados geográfica. O inventário mais completo de movimentos de vertente realizou-se em 2005, 2008 e 2009 e inclui 859 movimentos de vertente, a maioria do tipo deslizamento superficial (80% do total). Utilizando o método do valor informativo, aplicou-se uma análise sensitiva para identificar os factores condicionantes mais importantes (8 níveis espaciais temáticos) relacionados com a distribuição espacial dos deslizamentos superficiais. O uso do solo, o arranjo das vertentes e a exposição das vertentes são os factores condicionantes dos deslizamentos que apresentam taxas de sucesso mais elevadas. Nos mapas de susceptibilidade produzidos com diferentes números de factores condicionantes obtiveram-se bons resultados apenas com 3 factores. Os resultados devem ser analisados cuidadosamente pois resultam de poucos inventários. Adicionalmente, o uso do solo altera-se rapidamente para a obtenção de mais espaço para a plantação da vinha e os muros de suporte que sustêm a erosão dos solos são substituídos por taludes em terra.

Palavras-Chave

Movimentos de vertente; Valor Informativo; Análise Sensitiva; Vale do Douro; Maprisk

Introdução

O concelho de Santa Marta de Penaguião (70 km²), localizado no Vale do Douro, na Região Norte de Portugal, caracteriza-se por uma forte dinâmica de instabilidade de vertentes, que tem sido responsável por perdas humanas e materiais.

Nesta área foram testadas metodologias para a identificação, classificação e cartografia da susceptibilidade a movimentos de vertente, no âmbito do Projecto MapRisk (PTDC/GEO/68227/2006, financiado pela FCT, 2008-2010), que pretende desenvolver a análise da perigosidade e risco a movimentos de vertente, para fornecer uma base sólida, científica e técnica, para a tomada de decisões no planeamento ao nível municipal.

Este concelho localiza-se numa área de transição entre a Serra do Marão, no sector Norte, e o Vale do Douro, a Sul. Nesta área identificam-se as seguintes unidades geomorfológicas: cristas quartzíticas com abrupto rochoso; depressão tectónica com colmatação por aluviões; interflúvios aplanados; planície de inundação; vales encaixados em metaquartzograuvaques; vales encaixados em pelitos da formação da Desejosa; vertentes complexas em granitóides; e vertentes controladas pela tectónica.

Os declives mais elevados localizam-se no sector Norte do concelho, nas vertentes do sector Este da Serra do Marão, no vale do Rio Aguilhão e no sector Este ao longo do vale do Rio Corgo. As exposições das vertentes predominantes em Santa Marta de Penaguião são N, NE, E e SE.

Em relação ao perfil transversal das vertentes, os sectores côncavos das vertentes são ligeiramente dominantes (46% da área total) por comparação com os sectores convexos (43% da área total), devido ao encaixe da rede hidrográfica em rochas metassedimentares.

A nível geológico, na maior parte do concelho aflora a Formação da Desejosa, que corresponde a uma intercalação de filitos com laminação fina e paralela, e metaquartzograuvaques e metaquartzograuvaques, às vezes carbonatados. No Norte e no vale do Rio Corgo encontram-se alguns afloramentos da Formação do Pinhão, que é composta por filitos cloríticos, quartzo cloríticos e metaquartzograuvaques com magnetite. No limite Norte localiza-se uma mancha de granito de Parada de Cunhos, que é um granito de grão médio a grosseiro com esparsos megacristais de duas micas. No extremo Oeste do concelho encontram-se afloramentos de quartzitos e de conglomerado de Bojas.

A parte central do concelho tem uma grande densidade de fracturação, justificada pela presença do alinhamento tectónico de Verin-Régua-Penacova, que é acompanhado por uma faixa de deformação principal bastante mais larga.

A paisagem de Santa Marta de Penaguião é fortemente marcada pela monocultura da vinha com auxílio da mecanização da produção de vinho do Porto, que influencia a ocupação e arranjo intensivos das vertentes. Neste concelho cerca de 52% da área é ocupada por vinha, seguida pelas florestas mistas (16%), agricultura em espaços naturais (12,6%) e espaços florestais degradados (8%).

Na parte Sul do concelho a vinha domina a paisagem, enquanto a Oeste esta é progressivamente substituída pela floresta, agricultura em espaços naturais e pastagens naturais. O cultivo da vinha faz-se ao longo das vertentes, principalmente expostas a Sul, em encostas com os tradicionais muros de suporte, ou nos mais recentes taludes em terra. As estruturas construídas para o suporte dos terraços agrícolas aumentam a pressão sobre os materiais pelíticos, induzindo a instabilidade das vertentes.

Cerca de 47% da área do concelho não possui estruturas de suporte de terraços agrícolas e de prevenção da erosão, porque corresponde a vertentes naturais. Os tradicionais terraços agrícolas com muro de suporte de pedra em seco ocupam 34,4% da área do concelho, tendo vindo a ser progressivamente substituídos por taludes em terra, que neste momento ocupam 17,4% da área total do concelho. Os terraços agrícolas com taludes em terra foram introduzidos há cerca de 10 anos, com o propósito de reduzir custos de manutenção com os tradicionais muros de suporte e facilitar a automatização de trabalhos agrícolas. Os taludes em terras em vertentes têm sido expandidos para áreas bastante declivosas e sem sistemas de drenagem eficientes.

Objectivos

Neste artigo pretende-se avaliar quais são os factores condicionantes mais importantes na modelação da susceptibilidade a deslizamentos superficiais no concelho de Santa Marta de Penaguião. Nesta modelação foram utilizados 8 factores condicionantes (declives, exposições, perfil transversal das vertentes, densidade de fracturação, geologia, uso do solo, arranjo das vertentes e unidades geomorfológicas).

Para avaliar de entre este conjunto de factores condicionantes quais os que têm uma maior importância na explicação da localização dos deslizamentos superficiais translacionais, e determinar se é possível construir um modelo de susceptibilidade com boa capacidade preditiva com um número reduzido de factores condicionantes, realizou-se uma análise sensitiva.

O método aplicado implicou o cálculo das curvas de sucesso de vários modelos gerados pelo método do valor informativo, tal como Zêzere et al. (2007) já haviam realizado para a Região a Norte de Lisboa.

Metodologia

a) Base de dados de movimentos de vertente

O mapa do inventário de movimentos de vertente foi realizado, numa primeira fase, entre Junho e Setembro de 2008, tendo sido actualizado em Fevereiro de 2009. No total estão contabilizados 859 movimentos de vertente, a maior parte identificada em trabalho de campo (Fig. 1).

O tipo de movimento de vertente predominante é o deslizamento superficial (85% dos registos), localizado preferencialmente em terraços agrícolas sem muro de suporte.

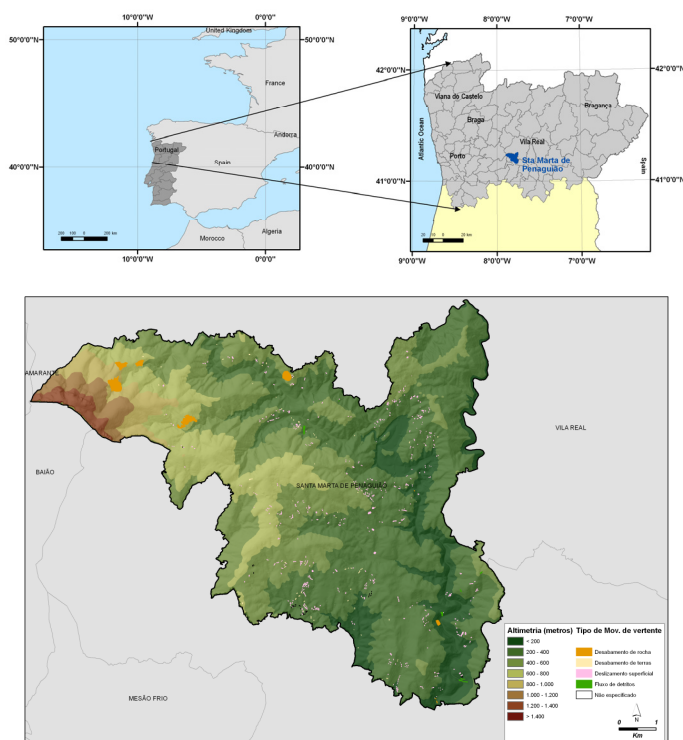


Figura 1. Localização do concelho de Santa Marta de Penaguião e Inventário de movimentos de vertente

b) Base de dados de factores condicionantes da instabilidade de vertentes

O estudo dos factores condicionantes da instabilidade foi precedido pela reunião da informação necessária para a sua cartografia. As curvas de nível têm uma equidistância de 10 metros. A partir das curvas de nível e de pontos cotados à escala 1:10 000 foi construído o MDT, do qual foi derivada informação sobre os declives, exposições e perfil transversal das vertentes.

As unidades geomorfológicas foram interpretadas a partir do MDT e da Carta Geológica à escala 1/ 50 000, tendo sido desenhadas à escala 1/ 5 000. Nos vales encaixados em pelitos da Formação da Desejosa regista-se 48% do total de deslizamentos superficiais. Nas áreas do concelho onde as vertentes são predominantemente controladas pela tectónica também há condições favoráveis para o desenvolvimento de deslizamentos superficiais translacionais (30% do total) e

por fluxos de detritos, pois as rochas encontram-se bastante alteradas e fracturadas em resultado da intensa fracturação regional. Nos vales encaixados em metaquartzograuaques encontram-se evidências de desabamento de rocha e fluxos de detritos, bem como deslizamentos superficiais (15% do total).

A informação dos declives foi classificada em oito classes ($< 5^\circ$; $5,1^\circ - 10^\circ$; $10,1^\circ - 15^\circ$; $15,1^\circ - 20^\circ$; $20,1^\circ - 25^\circ$; $25,1^\circ - 30^\circ$; $30^\circ - 35^\circ$; e $> 35^\circ$). A exposição das vertentes foi classificada em octantes e o conjunto das vertentes foram classificadas em côncavas, convexas e plano/ rectilíneas, de acordo com o seu perfil transversal, a partir de um MDT com um pixel de 50 m.

O maior número de deslizamentos superficiais não coincide sempre com as áreas de maiores declives. Os deslizamentos superficiais translacionais predominam nas vertentes expostas a S e SE, coincidindo com o maior desenvolvimento de terraços agrícolas com vinha, destinada à produção do vinho do Porto. O maior número de deslizamentos superficiais ocorre nas vertentes côncavas, no entanto as vertentes convexas também têm bastantes deslizamentos superficiais.

A litologia do concelho foi adaptada a partir de fontes com datas e escalas diferentes. É na Formação da Desejosa que ocorre a maior parte dos deslizamentos superficiais translacionais (75% do total), seguida da Formação do Pinhão (21% do deslizamentos superficiais). Nestas formações, os materiais mais instabilizáveis são as camadas de filitos, que são bastante argilosas e espessas.

A fracturação foi obtida a partir da cartografia geológica, do traçado e encaixe da rede hidrográfica e da análise da morfologia.

O uso do solo foi retirado da Corine Land Cover 2000 à escala 1/ 100 000, tendo sido validado e rectificado com trabalho de campo. As áreas de vinha ocupam cerca de 80% da área do concelho e registam um maior número de deslizamentos superficiais (85% da área instabilizada).

Os tipos de arranjo das vertentes foram vectorizados, a partir da análise de ortofotomapas à escala 1/5000. Nos terraços com muros de suporte registaram-se mais de 62% dos deslizamentos superficiais translacionais identificados no concelho. Numa posição secundária encontram-se os terraços sem muros de suporte, que incluem 22% dos deslizamentos superficiais.

c) Modelação da susceptibilidade a deslizamentos superficiais

Na modelação da susceptibilidade à escala 1: 10 000 aplicou-se um modelo de estatística bivariada (Valor Informativo) e unidades de terreno matriciais (pixel de 5 metros).

Os deslizamentos superficiais foram seleccionados para a modelação da susceptibilidade, pela sua maior importância no concelho, utilizando a metodologia de Zêzere et al. (2004, 2008) para a produção da cartografia de susceptibilidade. Esta cartografia foi elaborada com recurso ao conceito de função de favorabilidade (Chung e Fabri, 1999 e 2003).

Todos os mapas temáticos foram convertidos para unidades matriciais com pixel de 5 metros. Os resultados da avaliação da susceptibilidade, não classificada, a partir do Valor Informativo variam entre -12,227 e 2,882 e foram identificadas 10058 unidades de condições únicas.

A qualidade da predição dos mapas de susceptibilidade pode ser avaliada pela determinação das respectivas curvas das taxas de sucesso, construídas a partir do cruzamento do mapa da susceptibilidade com a distribuição dos deslizamentos superficiais translacionais.

Os resultados obtidos mostram que o modelo tem uma Área Abaixo da Curva bastante satisfatória (AAC=0,78). Em 10% da área de estudo estão localizados 30% dos deslizamentos superficiais translacionais, enquanto que em 20% da área de estudo se encontram 60% dos deslizamentos superficiais translacionais.

d) Análise sensitiva

Nesta análise considerou-se isoladamente cada um dos factores condicionantes da instabilidade. Para cada classe de cada factor condicionante foi calculado o respectivo Valor Informativo (V.I.) e representado cartograficamente. Em seguida, através do cruzamento da área de estudo classificada por ordem decrescente de susceptibilidade com o total de deslizamentos superficiais preditos foi calculada a taxa de sucesso.

O factor uso do solo tem a melhor taxa de sucesso (Quadro 1) com uma AAC de 0,810, seguido pelo arranjo das vertentes (AAC=0,683) e as exposições (AAC=0,675), o que prova a forte relação entre o uso do solo com o cultivo da vinha em terraços agrícolas localizados principalmente nas vertentes expostas ao quadrante Sul.

Quadro 1. Hierarquia dos factores condicionantes de instabilidade de vertentes,

N.º de Ordem	Factor Condicionante	AAC Taxa de Sucesso
1	Uso solo	0,810
2	Arranjo das Vertentes	0,683
3	Exposições	0,675
4	Unidades Geomorfológicas	0,604
5	Declive	0,593
6	Densidade de Falhas	0,549
7	Perfil Transversal das Vertentes	0,531
8	Litologia	0,527

O arranjo das vertentes é o o segundo factor mais relevante, devido à importância dos terraços agrícolas no desenvolvimento de instabilidade de vertentes. Nesta modelação, as vertentes com muros de suporte obtiveram o score mais alto de susceptibilidade. Contudo, após a observação de alguns episódios de precipitação com condições para o desencadeamento de deslizamentos superficiais, verificou-se que estes tendem a desenvolver-se mais rapidamente em áreas de

terraços agrícolas com taludes em terra. As unidades geomorfológicas são o quarto factor com melhor taxa de sucesso, pela destriça que fazem nas condições geomorfológicas condicionantes da localização dos deslizamentos.

A hierarquia dos factores de instabilidade (Quadro 1) foi respeitada na análise sensitiva, introduzindo-se uma nova variável a cada passo no modelo de susceptibilidade. Para cada combinação de variáveis no modelo foi calculada a respectiva taxa de sucesso (Quadro 2) e calculada a Área Abaixo da Curva (AAC).

Quadro 2. AAC das taxas de sucesso dos modelos de avaliação da susceptibilidade a deslizamentos superficiais obtidas por análise sensitiva com a combinação de diferentes variáveis condicionantes da instabilidade, segundo o método do V.I.

N.º de Variáveis	Variáveis Utilizadas	AAC Taxa de Sucesso
2	Uso do Solo + Arranjo das Vertentes	0,716
3	Uso do Solo + Arranjo das Vertentes + Exposição	0,758
4	Uso do Solo + Arranjo das Vertentes + Exposição + Unid. Geomorf.	0,750
5	Uso do Solo + Arranjo das Vertentes + Exposição + Unid. Geomorf. + Declive	0,764
6	Uso do Solo + Arranjo das Vertentes + Exposição + Unid. Geomorf. + Declive + Dens. de Falhas	0,766
7	Uso do Solo + Arranjo das Vertentes + Exposição + Unid. Geomorf. + Declive + Perfil Transv. Vertentes	0,764
8	Uso do Solo + Arranjo das Vertentes + Exposição + Unid. Geomorf. + Declive + Perfil Transv. Vertentes + Litologia	0,764

Resultados/Discussão

Na cartografia da susceptibilidade a qualidade e resolução espacial dos mapas de factores condicionantes influenciam os resultados das curvas de sucesso e o próprio zonamento da susceptibilidade. Um exemplo desta afirmação é a reduzida importância que o factor declive assumiu na análise sensitiva (é apenas o 5º factor mais importante no zonamento da susceptibilidade). Normalmente, quando se estudam deslizamentos superficiais translacionais, o factor declive assume uma maior importância, como por exemplo no trabalho de Zêzere et al. (2007).

No território de Santa Marta de Penaguião o declive não se assume como um factor com grande importância na modelação da susceptibilidade, o que pode estar relacionado com a resolução do Modelo Digital de Elevação. As curvas de nível utilizadas para a construção do MDE têm uma equidistância de 10 metros e não reflectem em pormenor a variação altimétrica do terreno, sobretudo nas áreas de terraços agrícolas. Neste contexto, as unidades geomorfológicas desempenham um papel de substituição da informação dos declives.

A litologia apresenta a mais baixa taxa de sucesso da AAC, o que pode ser justificado pelo grau de uniformidade existente na representação da Formação da Desejosa e do Pinhão, a que acresce o carácter superficial dos deslizamentos, pouco controlados pelas características do substrato profundo.

A análise sensitiva efectuada demonstrou que o acréscimo de factores condicionantes ao modelo de susceptibilidade não produz um aumento automático na taxa de sucesso. Com efeito, os deslizamentos superficiais translacionais podem ser preditos sem o conjunto completo de factores condicionantes e, assim mesmo, apresentar resultados satisfatórios. De acordo com a análise sensitiva realizada, sendo utilizadas 3 variáveis no modelo de susceptibilidade (uso do solo, arranjo das vertentes e exposição), a AAC da taxa de sucesso (0,758) é aproximada à obtida com as 8 variáveis (AAC= 0,764). A melhor taxa de sucesso (AAC = 0,766) é obtida com 6 variáveis: Uso do Solo + Arranjo das Vertentes + Exposição + Unidades Geomorfológicas + Declive + Densidade de Falhas.

En contrapartida, o incremento de novas variáveis no modelo de susceptibilidade reflecte-se no aumento significativo de unidades de condição única. Por exemplo, o modelo de susceptibilidade a deslizamentos superficiais translacionais obtido com 8 variáveis (uso do solo, exposição, unidades geomorfológicas, declive, densidade de falhas, geologia, perfil transversal das vertentes e estruturas de suporte nas vertentes) é constituído por 9351 condições únicas, enquanto que o modelo realizado com apenas 3 variáveis (uso do solo, arranjo das vertentes e exposição) possui apenas 256 condições únicas. Esta diferença confere ao mapa produzido com apenas 3 variáveis uma maior homogeneidade espacial, enquanto o mapa de susceptibilidade realizado com a totalidade de factores condicionantes apresenta uma maior variabilidade espacial, associada a um padrão menos uniforme de distribuição das classes de susceptibilidade.

Conclusões

A análise sensitiva mostra que o zonamento da susceptibilidade pode ser atingida com bons resultados com menos factores condicionantes, mas só funciona em áreas com as mesmas condições morfológicas, geológicas, climáticas e tipo de instabilidade de vertentes (Pereira, 2010). A qualidade e resolução espacial da informação cartográfica influenciam os resultados das curvas de sucesso.

Os mapas de susceptibilidade realizados com os 3 factores condicionantes que obtiveram as melhores taxas de sucesso apresentam uma maior homogeneidade espacial, porque possuem menos unidades de condições únicas. Os mapas de susceptibilidade realizados com todos os factores condicionantes têm uma maior variabilidade espacial e evidenciam uma maior fragmentação no zonamento.

Os resultados obtidos demonstram uma forte intervenção antrópica e volatilidade de alguns factores condicionantes, como o arranjo das vertentes, que também podem alterar o declive médio das vertentes e o uso do solo (Pereira, 2010). Deste trabalho também se conclui que o aumento do número de factores condicionantes introduzidos na modelação da susceptibilidade não implica um aumento directo das respectivas taxas de sucesso.

Referências

- Corine Land Cover, I&CLC 2000, Comissão Europeia, 2000.
- Chung, C.-J. F., & Fabbri, A., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65, No. 12, 1389-1399.
- Chung, C. F., & Fabbri, A. G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30, 451-472.
- Pereira, S., 2010. Perigosidade a movimentos de vertente na região Norte de Portugal. Dissertação de doutoramento em geografia física apresentada na faculdade de letras da Universidade do Porto, Abril de 2010.
- Zêzere, J. L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M. L., Vieira, G., et al., 2004. Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, pp. 133-146.
- Zêzere, J., Oliveira, S., Garcia, R., & Reis, E., 2007. Landslide risk analysis in the area North of Lisbon (Portugal): evaluation of direct and indirect costs resulting from a motorway disruption by slope movements. *Landslides*, 4, 123-136.
- Zêzere, J. L., Trigo, R., Fragoso, M., Oliveira, S. C., & Garcia, R. A., 2008. Rainfall-triggered landslides in the Lisbon region over 2006 and relationships with the North Atlantic Oscillation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, pp. 483-499.