

Utilização de modelos espaciais para a avaliação e validação da susceptibilidade e perigosidade geomorfológica¹

J. L. Zêzere
R. A. C. Garcia
S. C. Oliveira

Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa. jlzere@fl.ul.pt; rgarcia@fl.ul.pt; cruzdeoliveira@fl.ul.pt

Resumo: A avaliação da susceptibilidade do território à ocorrência de movimentos de vertente pode ser efectuada com recurso a métodos de cartografia directa ou indirecta, partindo do pressuposto de que os futuros movimentos de vertente têm maior probabilidade de ocorrer sob condições idênticas às que determinaram a instabilidade presente e passada. Uma das vantagens dos modelos de susceptibilidade baseados em métodos estatísticos consiste na possibilidade da sua validação, através da partição espaço-temporal das bases de dados dos movimentos de vertente. O potencial preditivo dos modelos construídos pode também ser utilizado para transformar a susceptibilidade numa avaliação probabilística da perigosidade, assumindo que as situações pluviométricas que originaram instabilidades nas vertentes no passado vão produzir efeitos idênticos cada vez que se repetirem no futuro.

Palavras-chave: Movimentos de vertente; Susceptibilidade; Perigosidade; Modelos espaciais

Abstract: *Spatial models for the assessment of landslide susceptibility and landslide hazard*

Landslide susceptibility can be assessed using direct (geomorphologic) or indirect (heuristic and statistic) methods. Both approaches are based on the general assumption that future landslides are more likely to occur under the same geological and geomorphological conditions that led to past slope instability. Evaluation of the predictive power of models with respect to future slope movements is a critical step to evolve from landslide susceptibility to the probabilistic landslide hazard assessment. Strictly speaking, validation of the prediction of future landslide activity is only possible with the 'wait and see' procedure, and this is particularly true for landslide susceptibility assessments based on direct methods. However, validation is possible using statistically based indirect methods through the spatial/temporal partitioning of the landslide databases. Such data partition allows the computation of prediction-rate curves as well as the quantitative interpretation and classification of the landslide susceptibility maps.

Integration of triggering information in the modelling procedure is possible, assuming that the same rainfall patterns (quantity/duration), which produced slope instability in the past, will produce the same effects in the future. Therefore, the coupling between the susceptibility map, prediction-rate curve and critical rainfall (amount-duration) triggering events allows the evaluation of landslide hazard as the probability of each pixel to be affected by a landslide, on a scenario basis. These probabilistic data can be easily integrated with vulnerability information of the study area, in order to go further on the landslide quantitative risk analysis.

Key-words: Landslide susceptibility; Landslide hazard; Spatial models

1. INTRODUÇÃO

A perigosidade natural (*natural hazard*) foi definida por Varnes *et al.* (1984) como “a probabilidade de ocorrência de um fenómeno potencialmente destruidor, numa determinada área e num dado período de tempo”. Deste modo, no caso dos movimentos de vertente, a avaliação da perigosidade implica a antecipação do comportamento das futuras manifestações de instabilidade geomorfológica, respondendo a três questões fundamentais, numa base probabilística: onde vão

¹ Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projecto de Investigação Europeu ALARM, *Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas* (Contract EVG1-CT-2001-00038)

ocorrer os futuros movimentos? (noção de localização espacial); quando vão ocorrer esses movimentos? (noção de recorrência temporal); qual é o seu potencial de destruição? (noção de intensidade/magnitude).

O interesse crescente pelo tema da predição dos movimentos de vertente à escala regional, verificado nas últimas duas décadas, é confirmado pela proliferação de trabalhos monográficos dedicados ao assunto, um pouco por todo o mundo, bem como pela divulgação de sínteses metodológicas, das quais se destacam, por exemplo, as apresentadas por Guzzetti *et al.* (1999), Alleotti e Chowdhury (1999) e Bichler *et al.* (2004). Estes últimos autores definem nove metodologias de base cartográfica para avaliação de perigo e risco de movimentos de vertente, baseando-se em 550 publicações recentes oriundas de 60 países de todas as regiões do mundo (Bichler *et al.*, 2004).

Independentemente das metodologias de análise, é hoje relativamente consensual que o estudo da perigosidade geomorfológica integra dois aspectos distintos (Van Westen *et al.*, 2003; Zêzere *et al.*, 2004): (i) a avaliação da susceptibilidade, entendida como a propensão do território à ocorrência de um tipo particular de movimento de vertente, com base nos factores preparatórios ou condicionantes da instabilidade; e (ii) a determinação da probabilidade de ocorrência de um evento desencadeador particular, como um episódio de precipitação intensa ou um sismo.

2. A AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE AOS MOVIMENTOS DE VERTENTE À ESCALA REGIONAL

O zonamento regional da propensão do terreno à ocorrência de movimentos de vertente é efectuado com o recurso a métodos de cartografia directa e indirecta (Guzzetti *et al.*, 1999; Alleotti e Chowdhury, 1999). No primeiro caso, o geomorfólogo determina o grau de susceptibilidade qualitativamente, com base na sua experiência e conhecimento de campo. A cartografia indirecta recorre a modelos estatísticos ou métodos heurísticos para a predição das áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de vertente, com base na análise das inter-relações entre a distribuição dos movimentos de vertente e o padrão espacial dos factores condicionantes da instabilidade. Em qualquer dos casos, é assumido que os futuros movimentos de vertente têm maior probabilidade de ocorrer sob condições geológicas e geomorfológicas idênticas às que determinaram a instabilidade presente e passada. Neste contexto, a cartografia dos movimentos de vertente já verificados e a identificação e representação cartográfica dos factores preparatórios ou condicionantes da instabilidade geomorfológica constituem elementos chave para a predição dos movimentos futuros.

2.1. Método directo

A Fig. 1 representa uma avaliação directa da susceptibilidade e perigosidade geomorfológica, efectuada na área amostra de Fanhões-Trancão, situada na Região a Norte de Lisboa (Zêzere, 1997). O método utilizado para a classificação do perigo inspira-se, fundamentalmente, em Dumas *et al.* (1984) e em Kienholz (1977-78, *in* Varnes *et al.*, 1984). O grau de perigo (fraco, moderado e forte) foi determinado tendo em consideração o potencial de destruição dos fenómenos de instabilidade; ou seja, toma em atenção a magnitude provável dos movimentos, particularmente no que respeita às áreas abrangidas e à profundidade dos planos de ruptura. A diferenciação da probabilidade reporta-se, exclusivamente, à sua dimensão espacial e toma em linha de conta o diferente grau de susceptibilidade do terreno aos movimentos de vertente considerados (assinalados por letras).

2.2. Método indirecto

Os métodos indirectos de avaliação da susceptibilidade, de base empírica ou estatística, são aplicados sobre unidades de terreno pré-definidas (base geométrica ou polígonos obtidos a partir do cruzamento de alguns factores condicionantes da instabilidade). Por outro lado, tem sido amplamente demonstrado que, num mesmo território, diferentes tipos de movimentos de vertente têm distribuições espaciais (e também ritmos temporais) distintas, determinadas por diferentes condicionalismos por

parte dos factores de instabilidade (Leroi, 1996; ZÊZERE, 2002; Van Westen *et al.*, 2003). Deste modo, são evidentes as vantagens em proceder à avaliação da susceptibilidade separadamente para cada tipo de movimento de vertente estudado.

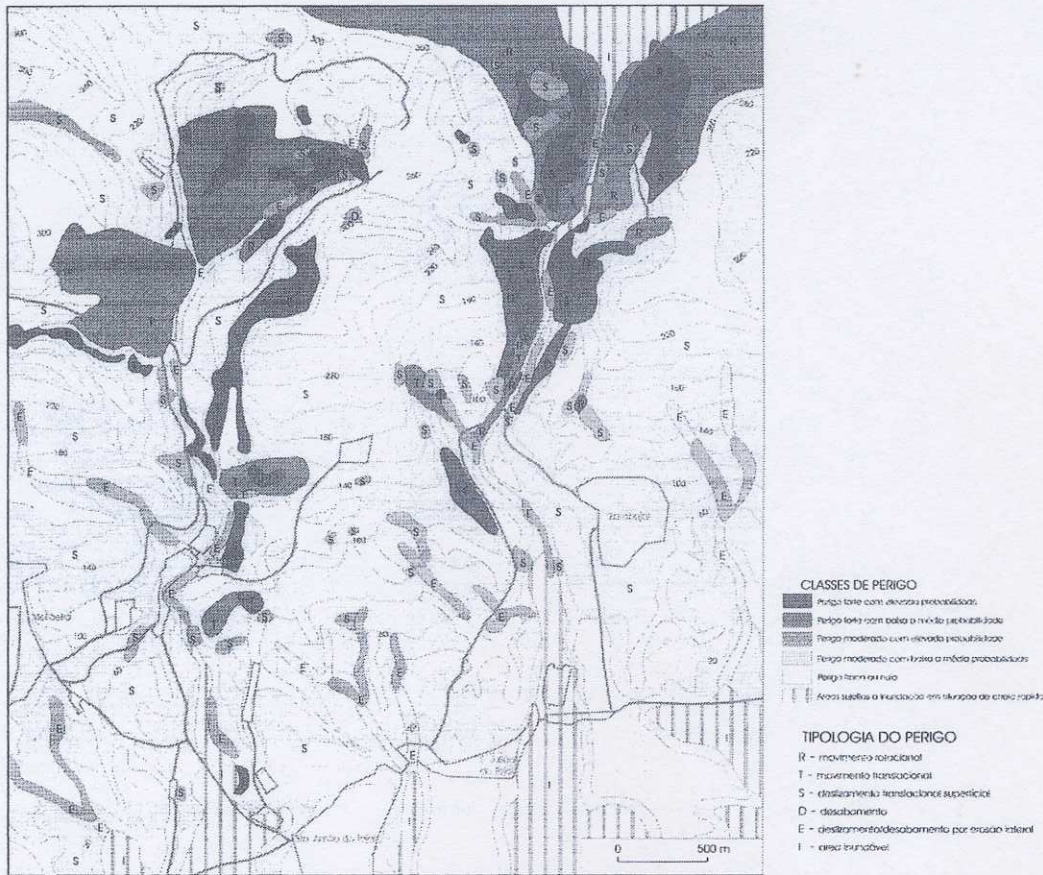


Fig. 1 - Avaliação directa da susceptibilidade / perigosidade na área amostra de Fanhões-Trancão (Zêzere, 1997).

A Fig. 2 sistematiza a metodologia de avaliação e validação da susceptibilidade, desenvolvida num Sistema de Informação Geográfica, no Projecto Europeu ALARM (*Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas, Contract EVG1-CT-2001-00038*). No presente trabalho, o método foi aplicado ao conjunto de 26 deslizamentos translacionais profundos identificados na área amostra de Fanhões-Trancão, representados na Fig. 3.

O conjunto de variáveis utilizadas (movimentos de vertente, declive, exposição, perfil transversal das vertentes, litologia, depósitos superficiais, unidades geomorfológicas e uso do solo) foi integrado através do algoritmo da Função de Probabilidade Condicional Conjunta (Chung *et al.*, 1995; Zêzere *et al.*, 2004), numa base matricial constituída por 798.109 *pixels* (1 *pixel* = 25 m²). Deste modo, foi possível obter um *score* de susceptibilidade (com valor compreendido entre 0 e 1) para cada um dos *pixels* que constituem a área estudada.

Uma das vantagens da utilização de métodos indirectos de base estatística para a avaliação da susceptibilidade geomorfológica reside na determinação, quantitativa e objectiva, do peso específico de cada variável na distribuição das manifestações de instabilidade passadas (Quadro I). No caso dos deslizamentos translacionais na área amostra de Fanhões-Trancão, destacam-se as vertentes com perfil transversal côncavo, com declive moderado (15-25°) e exposição aos quadrantes S e SW, isto é, coincidente com o sentido geral da inclinação das formações geológicas. Por outro lado, as margas e calcários margosos e as vertentes de vale são, respectivamente, as unidades litológica e geomorfológica mais susceptíveis ao tipo de instabilidade considerado. Por último, destacam-se as

vertentes cobertas por coluviões mais espessos e por depósitos de enchimento de valeiros, bem como as áreas que apresentam coberto vegetal herbáceo.

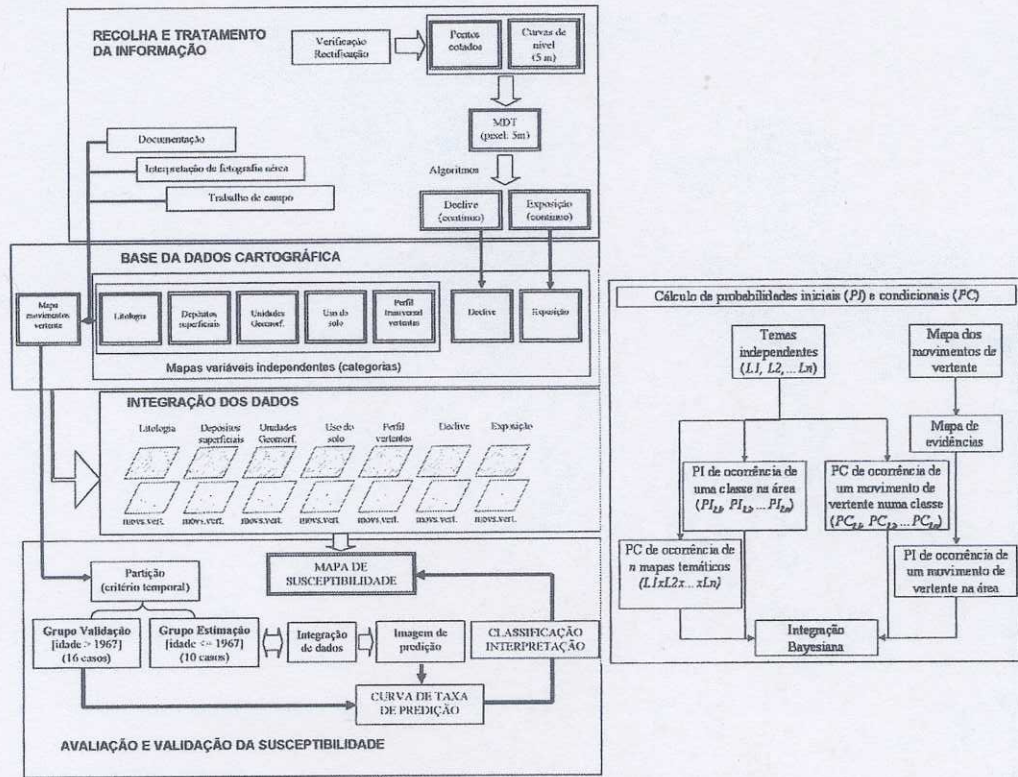


Fig. - 2. Metodologia geral de avaliação da susceptibilidade aos movimentos de vertente.

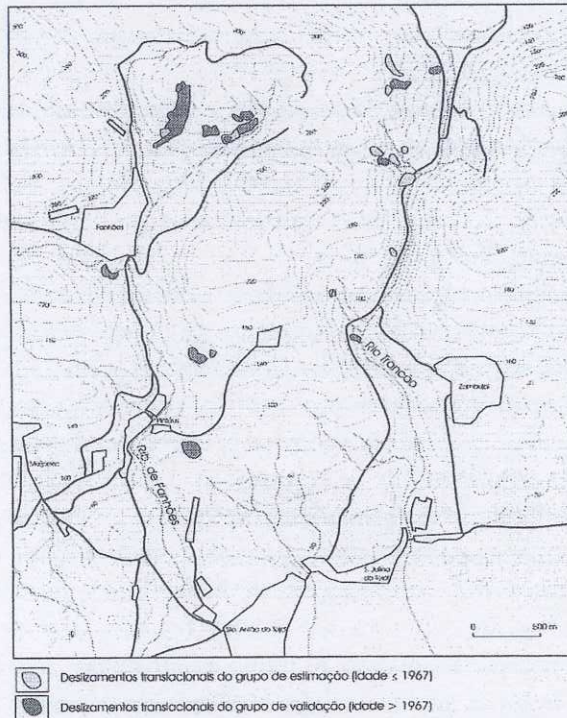


Fig. 3 - Distribuição dos movimentos de vertente do tipo deslizamento translacional na área amostra de Fanhões-Trancão.

Quadro I. Scores das variáveis utilizadas na construção do modelo de susceptibilidade, considerando o conjunto total de deslizamentos translacionais. As variáveis com maior influência na distribuição dos movimentos estão assinaladas a **bold**.

	Score susceptibilidade		Score susceptibilidade
Declive		Exposição	
0-5°	0,0018	Áreas planas	0,0000
5-10°	0,0068	N	0,0015
10-15°	0,0129	NE	0,0037
15-20°	0,0158	E	0,0100
20-25°	0,0171	SE	0,0096
25-30°	0,0151	S	0,0113
30-40°	0,0140	SW	0,0103
> 40°	0,0158	W	0,0033
Perfil transversal vertentes		NW	0,0023
Côncavo	0,0131	Litologia	
Rectilíneo	0,0094	Arenitos e calcários	0,0062
Convexo	0,0070	Margas e calcários margosos	0,0320
Áreas planas	0,0008	Calcários com rudistas	0,0034
Auto-estrada A9 (CREL)	0,0202	Basaltos e tufo vulcânicos	0,0031
Depósitos superficiais		Calcários lacustres	0,0000
Aluviões	0,0000	Conglomerados e arenitos	0,0000
Coluviões com espessura <0,5m	0,0070	Unidades geomorfológicas	
Coluviões com espessura >0,5m	0,0123	Canal fluvial sujeito a erosão activa	0,0045
Escoada de detritos de S. Julião do Tojal	0,0000	Planície aluvial	0,0000
Depósito de terraço com textura fina	0,0000	Anverso de costeira	0,0152
Depósito de terraço de cheia recente	0,0000	Outras vertentes anaclinais	0,0000
Depósito de enchimento de valeiro	0,0142	Vertente cataclinal	0,0019
Uso do solo		Vertente de vale	0,0223
Coberto arbóreo	0,0029	Valeiro de fundo em U	0,0044
Coberto arbustivo denso	0,0099	Terraço fluvial	0,0000
Coberto herbáceo	0,0107	Superfície plana	0,0018
Terrenos cultivados	0,0047	Pedreira	0,0000
Espaço verde urbano	0,0000	Outras áreas antrópicas	0,0000
Áreas urbanas	0,0027		

A Fig. 4 apresenta a taxa de sucesso do modelo de susceptibilidade, que evidencia um excelente ajuste aos dados originais, confirmado pela integração de cerca de 60% do conjunto dos deslizamentos translacionais nos 5% de território classificado como mais susceptível.

A validação da avaliação de susceptibilidade, efectuada com o objectivo de determinar o potencial preditivo do modelo construído, foi obtida através da partição espaço-temporal da base de dados dos deslizamentos translacionais. Assim, o processo de integração de dados foi repetido com a utilização de um grupo de deslizamentos de estimação (movimentos com idade ≤ 1967 ; 10 casos), e o novo modelo foi validado com o grupo de deslizamentos de validação (movimentos com idade >1967 ; 16 casos). A curva de predição obtida está representada na Fig. 4 e é utilizada para interpretar e estabelecer de forma consistente as classes no mapa de susceptibilidade inicial (construído com o conjunto dos deslizamentos translacionais). Os resultados estão sistematizados no Quadro II e na Fig. 5 e a sua interpretação indica que, num horizonte temporal não especificado, os futuros deslizamentos translacionais vão distribuir-se pelas classes de susceptibilidade da seguinte forma: 61% na classe I, 14% na classe II, 4% na classe III, 21% na classe IV e 0% na classe V.

3. AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE COM BASE PROBABILÍSTICA

A transformação da susceptibilidade em perigosidade, expressa de modo probabilístico, implica a disponibilidade de informação acerca do número e dimensão expectáveis dos movimentos de vertente que deverão ocorrer num determinado período de tempo futuro. No caso dos movimentos de vertente desencadeados pela precipitação, a análise estatística dos episódios chuvosos permite a definição dos

limiares críticos de quantidade/duração da precipitação e o cálculo dos respectivos períodos de retorno (Zêzere, 1997). Deste modo, se for assumido que as situações pluviométricas que originaram instabilidades nas vertentes no passado vão produzir efeitos idênticos (i.e., o mesmo tipo de movimentos de vertente e áreas totais instáveis equivalentes) cada vez que se repetirem no futuro, é possível a classificação da perigosidade numa base probabilística, enquadrada num cenário desencadeante cujo período de retorno é conhecido.

Quadro II. Classes de susceptibilidade aos deslizamentos translacionais na área amostra de Fanhões-Trancão e respectivo valor preditivo.

Classe de susceptibilidade	Scores de susceptibilidade (ordem decrescente)	Área (# pixels)	Valor preditivo da classe
I	0-9%	72518	0,6080
II	9-13%	32423	0,1418
III	13-17%	33071	0,0426
IV	17-75%	465020	0,2076
V	75-100%	195077	0,0000

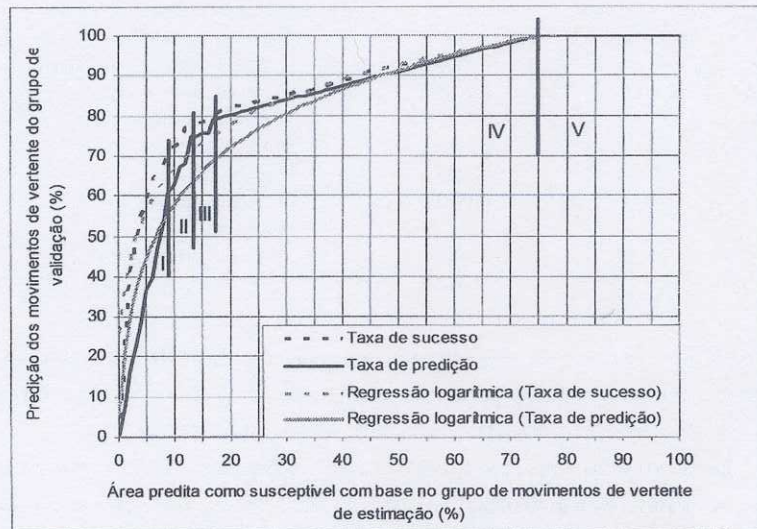


Fig. 4 - Curvas de sucesso e de predição da avaliação de susceptibilidade aos deslizamentos translacionais na área amostra de Fanhões-Trancão.

O Quadro III apresenta os dados de dois cenários desencadeantes bastante contrastados, o primeiro correspondente a uma situação de precipitações abundantes e prolongadas no tempo e o segundo relativo a um episódio de chuva muito intensa e concentrada.

Quadro III. Cenários de precipitação desencadeante considerados para a avaliação probabilística da perigosidade.

Cenário desencadeante	Precipitação crítica quantidade/duração (mm/dias)	Período de retorno (anos)	Área afectada por deslizamentos translacionais (m ²)
[1] "Tipo" Fevereiro 1979	694/75	20	106.933
[2] "Tipo" Novembro 1983	164/1	200	4.672

A probabilidade condicional de ocorrência futura de um deslizamento translacional pode ser determinada por pixel, para cada um dos cenários desencadeantes, tendo em consideração o valor preditivo das classes de susceptibilidade e a área total que se assume vir a ser instabilizada em cada

situação desencadeante. O Quadro IV sistematiza os resultados obtidos, sendo evidente a perigosidade muito elevada associada ao cenário [1], quando comparada com a resultante do cenário de precipitação intensa e concentrada [2].

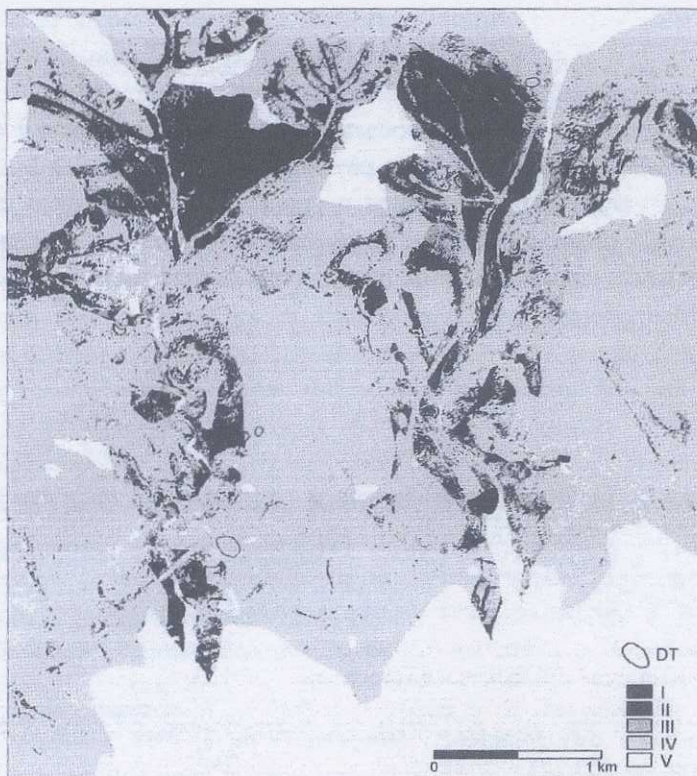


Fig. 5 - Avaliação indirecta da susceptibilidade aos deslizamentos translacionais na área amostra de Fanhões-Trancão, através da Função de Probabilidade Condicional Conjunta. DT – deslizamentos translacionais; I, II, III, IV, V – classes de susceptibilidade.

Quadro IV. Cálculo de probabilidades para a avaliação da perigosidade de deslizamento translacional, com base em cenários desencadeantes.

Classe de susceptibilidade	Área (# pixels)	Valor preditivo da classe	Probabilidade de cada pixel ser afectado por um deslizamento	
			Cenários desencadeantes	
			[1] "Tipo" Fevereiro 1979	[2] "Tipo" Novembro 1983
I	72518	0,6080	0,0359	0,0016
II	32423	0,1418	0,0187	0,0008
III	33071	0,0426	0,0055	0,0002
IV	465020	0,2076	0,0019	0,0001
V	195077	0,0000	0,0000	0,0000

4. CONCLUSÃO

O grande inconveniente tradicionalmente apontado à avaliação directa da susceptibilidade reside na elevada subjectividade que caracteriza todas as fases do processo, o que torna praticamente impossível a determinação do grau de incerteza inerente ao zonamento. Por outro lado, a avaliação do potencial preditivo destes modelos não é possível sem o recurso ao princípio de "esperar para ver", o que levanta problemas adicionais ao objectivo da sua aplicação prática. Com efeito, o tempo

necessário para a ocorrência de um número significativo de novos movimentos de vertente é, geralmente, demasiado longo para ser compatível com as necessidades do Ordenamento do Território.

Os métodos indirectos de avaliação da susceptibilidade com suporte estatístico, quando acompanhados por procedimentos de validação baseados na partição espacio-temporal da base de dados de movimentos de vertente original, permitem a determinação do poder preditivo dos modelos construídos, bem como a definição consistente dos limites das classes de susceptibilidade. Por outro lado, os resultados do cruzamento da análise frequencial dos movimentos de vertente com os períodos de retorno dos eventos desencadeadores, podem ser integrados nos modelos espaciais, de forma a evoluir da susceptibilidade para uma avaliação probabilística da perigosidade.

Os dados probabilísticos correspondentes a cenários desencadeantes com período de retorno conhecido apresentam a vantagem adicional de poderem ser facilmente integrados com a informação relativa à vulnerabilidade e ao valor dos elementos vulneráveis, para o objectivo final da avaliação quantitativa do risco de deslizamento.

BIBLIOGRAFIA

- Aleotti, P. e Chowdhury, R. (1999) – “Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives”. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 58, pp. 21-44.
- Bichler, A.; VanDine, D. e Bobrowsky, P. (2004) – “Landslide Hazard and Risk Mapping – A Review and Classification”. *Géo Québec 2004, 57th Canadian Geotechnical Conference*, Section 5C, pp. 1-12.
- Chung, C.F.; Fabbri, A. e Van Westen, C.J. (1995) – “Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation”. In, Carrara, A. and Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 107-133.
- Dumas, B.; Gueremy, P.; Lhenaff, R. e Raffy, J. (1984) – “Mouvements de terrain et risques associés. Présentation d'un essai cartographique”. *Mouvements de Terrain. Colloque de Caen, Documents du B.R.G.M.*, 83, Paris, pp. 163-171.
- Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M. e Reichenbach, P. (1999) – “Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy”. *Geomorphology*, 31, Elsevier, pp. 181-216.
- Leroi, E. (1996) – “Landslide hazard - Risk maps at different scales: Objectives, tools and developments”. In Senneset (Ed.) - *Landslides, Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides*, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, pp. 35-51.
- Van Westen, C. J.; Rengers, N.; Soeters, R. (2003) – “Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment”. *Natural Hazards*, 30, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 399-419.
- Varnes, D. J. and International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes (1984) - *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. UNESCO, Paris, 63p.
- Zêzere, J. L. (1997) - *Movimentos de vertente e perigosidade geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 575p.
- Zêzere, J. L. (2002) – “Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal)”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 2, 1/2, European Geophysical Society, pp. 73-82.
- Zêzere, J. L.; Reis, E.; Garcia, R.; Oliveira, S.; Rodrigues, M. L.; Vieira, G. e Ferreira, A. B. (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*, vol. 4, European Geosciences Union, pp. 133-146.