

LUCIANO LOURENÇO
(COORDS.)

IMPRESA DA
UNIVERSIDADE
DE COIMBRA
COIMBRA
UNIVERSITY
PRESS

GEOGRAFIA, CULTURA E RISCOS

LIVRO DE HOMENAGEM AO
PROF. DOUTOR ANTÓNIO PEDROSA



**O TIPO DE VEGETAÇÃO COMO FATOR
DIFERENCIADOR NA SUSCETIBILIDADE À
OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS NA ILHA DA
MADEIRA: O CASO DA BACIA DA RIBEIRA DA TABUA**
THE TYPE OF VEGETATION AS A DRIVER FOR THE
SUSCETIBILITY TO LANDSLIDE IN THE MADEIRA
ISLAND: THE CASE OF TABUA WATERSHED

Albano Figueiredo

Departamento de Geografia e Turismo
Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território
Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra
geofiguc@gmail.com

Aida Pupo-Correia

Centro de Competências de Ciências da Vida – Universidade da Madeira
Escola Secundária Jaime Moniz
aidapupo@sapo.pt

Miguel Menezes de Sequeira

Centro de Competências de Ciências da Vida – Universidade da Madeira
Direção Regional de Florestas-Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais
sequeira@uma.pt

Sumário: A gestão do risco de aluvião na Ilha da Madeira impõe-se, nos dias de hoje, como um dos principais desafios à gestão do território desta ilha, tendo em conta os significativos impactes negativos registados aquando de episódios de aluvião. Apesar da suscetibilidade natural à ocorrência de episódios de aluvião, resultante da combinação de uma topografia muito acidentada e um regime de precipitação com uma forte componente torrencial, o padrão de uso e ocupação do solo contribuíram decisivamente para reforçar a vulnerabilidade perante este tipo de catástrofe natural.

A profunda alteração histórica das condições da vegetação, como reflexo da implantação de atividades primárias (agricultura, pastoreio) por um lado, e a ocupação urbana do sector terminal das ribeiras por outro, vieram contribuir para tal. Como consequência, são factuais as avultadas perdas económicas, e mesmo perdas de vidas, como os registos identificam ao longo da história de ocupação da ilha. Estas perdas estão muito determinadas pelo facto de estes episódios de cheias rápidas terem associado uma elevada capacidade destrutiva, motivada pelo importante transporte de sólidos, alimentadas a montante por movimentos de vertente, como escoadas lamacentas ou deslizamentos translacionais. Neste trabalho procura-se avaliar o papel que o tipo de vegetação pode exercer em termos de condicionamento da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos, utilizando como estudo de caso a bacia da Ribeira da Tabua e tendo por referência o episódio de aluvião registado no dia 20 de fevereiro de 2010.

Palavras-chave: Aluvião, comunidades vegetais, composição florística, fisionomia.

Abstract: The management of flash floods on the Madeira Island is one of the big challenges that such territory is facing on modern days concerning spatial planning. In addition to natural susceptibility, resultant from the combination of a complex topography and a strongly irregular annual precipitation pattern, land use deeply contributed to reinforce vulnerability to such natural disasters. Deep disturbance of native vegetation by human activities and the location of urban areas at the terminal section of streams deeply contributed to such situation, contributing intensely to economic losses and human fatalities, such as those registered throughout the historical occupation of the island. Such negative impacts are partly determined by the fact that such flash floods are associated to heavy transportation of solid material, fed by landslides. This work aims to evaluate the role of different types of vegetation on the control of susceptibility to the occurrence of landslides using by reference the watershed of the Tabua creek.

Keywords: Flash floods, vegetation communities, floristic composition, physiognomy.

Introdução

A combinação de fatores topográficos, climáticos, e de uso do solo ajudam a explicar a importante dinâmica erosiva que caracteriza a Ilha da Madeira historicamente (Silva & Menezes, 1998) e na atualidade. Trata-se de uma ilha montanhosa que apresenta um regime pluviométrico muito irregular, claramente marcado pelo importante registo de episódios de precipitação intensa, tanto em volume de precipitação como em número de eventos (Maciel, 2005), que na ilha desencadeiam a ocorrência de aluviões, cheias rápidas caracterizadas por um caudal sólido muito importante. Vários são os registos históricos que fazem referência a estes eventos, pelo seu efeito destruidor e consequentes perdas económicas (Silva & Menezes, 1998; Quintal, 1999; Sepúlveda, 2011). Associadas a um momento em que as ribeiras aumentam de forma significativa a sua capacidade de transporte, as aluviões são conhecidas pelas importantes perdas económicas e de vidas humanas, principalmente nas áreas urbanas da ilha, uma vulnerabilidade associada à concentração das populações e infraestruturas no sector terminal das ribeiras. Além da contribuição direta da erosão laminar e em sulcos, responsável por erosão em áreas associadas ao uso agrícola ou pastoreio intensivo, o elevado caudal sólido associado a estes eventos está ainda muito determinado pela ocorrência de deslizamentos.

Ainda que os movimentos em massa tenham um papel importante na evolução do relevo das ilhas da Macaronésia (Fernández-Palacios *et al.*, 2011), a densidade de deslizamentos registados em episódios de aluvião parece estar reforçada pelos padrões de uso do solo vigentes ao longo de 600 anos, assumindo especial destaque no passado recente (Baioni, 2011). Assim, além de fatores de ordem natural (clima, topografia), a intervenção do homem reforçou a suscetibilidade territorial a este tipo de ocorrências, nomeadamente pelas opções ao nível do uso do solo, as quais se manifestaram numa alteração profunda das condições do coberto vegetal. As formações arbóreas na face sul da ilha estão hoje, sobretudo, resumidas a eucaliptais instalados entre os 600 e os 900 m de altitude, progressivamente invadidos por acácias, principalmente acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Willd.) e acácia-austrália (*A. melanoxylon* R. Br.). As cotas altimétricas inferiores são dominadas

pela paisagem agrícola e pelo uso urbano, enquanto que a altitudes superiores a paisagem, associada durante séculos ao pastoreio, está dominada por comunidades herbáceas que vão cedendo perante o avanço dos giestais, um processo também favorecido pela ocorrência de incêndios, como os que se registaram no verão de 2010. A vegetação nativa está, portanto, limitada hoje a pequenas manchas. Perante este cenário, e tendo em conta o evento de aluvião de 20 fevereiro de 2010, este trabalho procura avaliar o papel que os diferentes tipos de vegetação, considerando aspetos fisionómicos e florísticos, podem deter em termos de condicionamento da predisposição para a ocorrência de deslizamentos. Ainda que não seja possível fazer uma avaliação direta do efeito que as alterações no coberto vegetal promovem em termos de variação da suscetibilidade à ocorrência deste tipo de eventos, uma vez que não é possível avaliar a situação pré-ocupação da ilha, a confirmação da hipótese de que estas promoveram um aumento da suscetibilidade territorial pode ser feita com base na avaliação da contribuição dos diferentes tipos de vegetação presentes, contrapondo diferentes fisionomias e composições florísticas, as quais espelham diferentes graus e tipos de perturbação associados ao uso do solo.

Este objetivo tem por base a hipótese de que a vegetação tem um papel relevante para a compreensão da dinâmica erosiva de um território, figurando as formações arbóreas como o tipo de vegetação mais eficaz ao nível da proteção que oferecem ao solo (Nunes *et al.*, 2012), estando este papel reforçado em comunidades mais densas e contínuas (Roxo, 1988). Esta ideia está claramente associada ao papel da vegetação na redução dos efeitos diretos da ação mecânica e da escorrência em episódios de chuva. Mas este efeito protetor não se pode generalizar no caso da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente, uma vez que pode haver contribuições diferenciadas para comunidades com a mesma fisionomia mas composições florísticas distintas, seja no sentido protetor ou no facilitador. Segundo Figueiredo *et al.* (2013), as comunidades arbustivas ou arbóreas apresentam suscetibilidades à ocorrência de deslizamentos diferenciadas segundo a sua composição florística. O que remete para a ideia de que a composição florística das comunidades pode desempenhar um papel importante para a diferenciação da suscetibilidade territorial a este tipo de eventos. Apesar da importância que este fator pode desempenhar, nem sempre se inclui nos processos de análise de

suscetibilidade (Policarpo, 2012), surgindo mais como um elemento de caracterização do território (Pedrosa & Pereira, 2011). Com frequência esta análise está suportada essencialmente na valorização da componente topográfica, e a referência ao tipo de vegetação está mais direcionada para a perspetiva do uso do solo (Piedade, 2009), no sentido de identificar as intervenções humanas que mais contribuem para a instabilização das vertentes (Zêzere *et al.*, 1999). Quando se inclui o tipo de vegetação como fator condicionante da predisposição à ocorrência destes processos, poucas vezes se tem compreendido a sua real contribuição. Esta realidade está muito associada ao facto de os intentos de avaliação do contributo desta variável devolverem resultados que indicam uma contribuição modesta. Ainda que este aspeto esteja muito determinado por condições territoriais específicas, pelo que o efeito é variável, nomeadamente pelos atributos dos tipos de vegetação presentes, estes resultados podem traduzir, mais do que ausência de relações, o efeito enviesante associado à estrutura (nível de desagregação categórica) da classificação em uso, nomeadamente pelos pressupostos em que se baseia, e a resolução espacial utilizada, que frequentemente é pouco adequado a uma real discriminação. Ou seja, esta realidade resulta frequentemente do facto de haver falta de correspondência entre a resolução destes eventos e a escala espacial da informação produzida para os atributos da vegetação. Pesa ainda a falta de atualização da informação disponível e a natureza e nível de desagregação das classificações usadas, que em função dos objetivos e escala espacial utilizada, não se adequam aos objetivos da análise pretendida. Neste trabalho procura-se explorar o possível contributo dos diferentes tipos de vegetação no condicionamento da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos, procurando também avaliar se o poder preditivo desta variável é importante em processos de modelação preditiva direcionados a este tipo de avaliação. Este trabalho enquadra-se assim no esforço necessário para se conhecer com rigor a contribuição dos diferentes fatores que contribuem para a suscetibilidade territorial deste tipo de eventos na Ilha da Madeira, tanto mais que os cenários climáticos apontam para um aumento da frequência e intensidade dos paroxismos climáticos, nomeadamente de episódios de precipitação intensa (Santos & Miranda, 2006), os quais são entendidos como um fator desencadeante (Ramalheira *et al.*, 2014).

Área em Estudo

A avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamento desenvolvida neste trabalho tem por base a realidade da bacia da ribeira da Tabua (fig. 1). Trata-se de uma pequena bacia hidrográfica, com uma área de aproximadamente 9 km², localizada no sector ocidental da face sul da Ilha da Madeira. Como é característico da Ilha da Madeira, a bacia tem pouco desenvolvimento longitudinal, sendo a distância entre as cabeceiras e a foz de aproximadamente 8 km. Tendo em conta esta reduzida distância, e dada a significativa diferença altimétrica entre os dois sectores mencionados, o perfil longitudinal da ribeira é marcado por um declive significativo, principalmente no sector de cabeceiras, instaladas no bordo oriental do Paul da Serra. Este comportamento traduz bem o comportamento topográfico da bacia, que se caracteriza por apresentar áreas importantes com declives acentuados (declive médio: 36°). Esta condição topográfica promove desde logo uma elevada suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente.

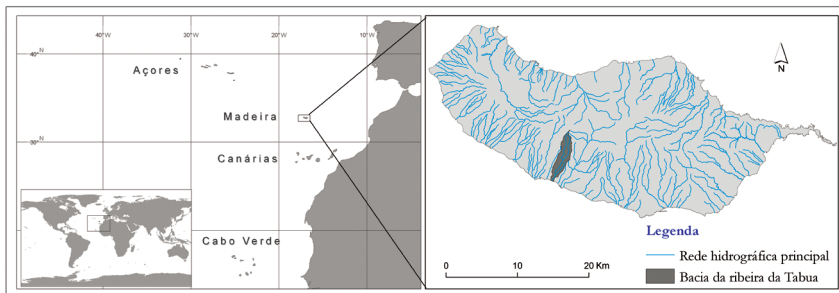


Fig. 1 - Localização da área em estudo (bacia da ribeira da Tabua).

Fig. 1 - Study area (Tabua creek's basin).

Em termos de vegetação e uso do solo, e à semelhança do que se verifica em toda a face sul da ilha, a vegetação natural apresenta um elevado grau de perturbação. As comunidades nativas estão limitadas a pequenas áreas, e correspondem a etapas subseriais, normalmente formações arbustivas dominadas por urze (*Erica arborea* e *E. maderincola*). Enquanto que as áreas de cabeceiras estiveram associadas

ao pastoreio, os sectores intermédios com acentuados declives sofreram processos de reflorestação baseados na utilização de espécies exóticas, como o eucalipto. Nestes sectores intermédios, onde o declive era menos desfavorável, instalou-se a agricultura, que se desenvolve, grosso modo, até à linha de costa. A área mais densamente urbanizada encontra-se principalmente no sector terminal da bacia, numa paisagem dominada pela ocupação agrícola organizada em socalcos. Tanto a agricultura como o pastoreio registaram uma perda de importância muito significativa nas últimas três décadas, mais evidente nos sectores intermédios e de cabeceiras. Áreas significativas onde o pastoreio foi retirado mantiveram até hoje o domínio de comunidades herbáceas, coincidindo normalmente com as áreas de menor declive e maior intensidade do pastoreio. Em áreas de maior declive das cabeceiras, com prolongamentos para os sectores intermédios, a dinâmica da vegetação está hoje muito associada à instalação de comunidades arbustivas dominadas sobretudo por giestas (*Cytisus scoparius*, *Cytisus striatus*), espécies introduzidas na ilha devido ao seu crescimento rápido e utilização para diferentes fins (lenha, alimento e cama do gado, fertilizante). Se atendermos ao facto de os modelos de vegetação potencial preverem para estes sectores formações arbóreas (Capelo *et al.*, 2004), então a situação atual representa uma alteração importante da paisagem e das condições da vegetação por efeito da atividade humana.

Metodologia

A avaliação da importância do tipo de vegetação para a suscetibilidade territorial à ocorrência de deslizamentos é feita de forma direta e por comparação com outras variáveis consideradas como importantes fatores condicionantes, nomeadamente fatores de natureza morfo-estrutural (declive, litologia, posição topográfica, perfil de curvatura, perfil transversal).

Esta avaliação tem por base os registos de deslizamento associados ao episódio de precipitação intensa do dia 20 de fevereiro de 2010, que origina uma importante aluvião nos concelhos do Funchal e Ribeira Brava. Este evento ocorre na sequência de eventos de precipitação intensa em dias próximos, e enquadrado

num inverno especialmente pluvioso. Além de os totais de precipitação acumulada entre outubro de 2009 e fevereiro de 2010 superarem os 1000mm, nalguns dias anteriores e no dia 20 de fevereiro a precipitação diária superou os 100 mm. No dia 20, além dos elevados totais registados, a intensidade revelou-se um fator determinante, pois nalgumas áreas o total de precipitação foi de 60mm em 30 minutos (EARAM, 2010). A identificação dos deslizamentos, realizada no âmbito do projeto EARAM (Estudo de Avaliação do Risco de Aluvião na Madeira), está baseada num processo de classificação de imagens multiespectrais Geoeye-1 de muito alta resolução recolhidas antes (21 e 29 de julho de 2009) e depois do evento (23 e 28 de fevereiro de 2010), em combinação com informação obtida a partir de ortofotomapas também de data anterior (2007) e posterior ao evento (EARAM, 2010). Neste trabalho não há uma desagregação entre os diferentes tipos de deslizamento quanto ao tipo (rotacionais, translacionais) ou profundidade (superficiais, profundos), e a análise não valoriza a distinção das diferentes unidades do deslizamento (cicatriz, corpo, pé). Já a classificação da vegetação baseou-se em foto-interpretação a partir de orto-fotomapas de data anterior ao evento (2007)¹. Além de parâmetros de natureza florística, a classificação das diferentes unidades de vegetação teve ainda por referência aspetos da estrutura (comunidades abertas, comunidades fechadas) e fisionomia (comunidades herbáceas, comunidades arbustivas, comunidades arbóreas). A utilização desta classificação de carácter misto procura introduzir, de forma indireta, informação relacionada com a interferência da vegetação em termos de estabilidade do solo, como a densidade e profundidade do enraizamento, o que pressupõe algum grau de condicionamento à ocorrência de deslizamentos, principalmente dos de tipo superficial. Uma vez que o tipo de sistema radicular interfere, não só devido à densidade (Tasser *et al.*, 2003) como pela profundidade ou extensão (Sidle & Terry, 1992), a inclusão de uma classificação detalhada desta natureza contribui para incluir no processo de avaliação um tipo de informação que é difícil de avaliar de forma direta. Informação esta que pode ajudar a melhorar a capacidade explicativa/preditiva dos modelos produzidos.

¹ Ortofotomapas cedidos pela Direção Regional de Cartografia Cadastro da Região Autónoma da Madeira.

A avaliação da importância dos tipos de vegetação para a suscetibilidade territorial baseia-se em dois momentos. Num primeiro momento é avaliado o grau de associação (qui-quadrado e V de Cramer) entre a ocorrência de deslizamentos (variável dependente dicotômica: 0/1) e os diferentes tipos de vegetação (variável independente de natureza categórica), avaliação que se realiza para todas as variáveis consideradas (TABELA I).

Esta avaliação permite estimar a existência de uma relação espacial entre os diferentes tipos de vegetação e a ocorrência de deslizamentos. A suscetibilidade foi avaliada com base no método estatístico bivariado *Likelihood ratio* (Lee *et al.*, 2007). De base *bayesiana*, este método permite diferenciar o grau de suscetibilidade de cada categoria das variáveis em uso com base na quantificação da relação existente com a ocorrência de deslizamentos. Esta avaliação é obtida através do quociente entre o *ratio* da área dos deslizamentos (área deslizada em cada categoria em relação ao total da área deslizada na bacia, avaliado em número de píxeis) e o *ratio* da área de cada categoria das variáveis em uso (área de cada categoria em relação à área da bacia, avaliado em número de píxeis) (Lee *et al.*, 2007; Piedade *et al.*, 2010; Figueiredo *et al.*, 2013).

Num segundo momento, e de forma a avaliar o peso relativo que cada variável detém na previsão da suscetibilidade territorial, recorreu-se a modelos preditivos de natureza correlativa. Estes modelos baseiam-se na utilização de uma técnica de modelação de base correlativa suportada no princípio da máxima entropia (MAXENT), avaliada como tendo boa capacidade discriminatória em processos de modelação (Elith *et al.*, 2006; Figueiredo, 2008). A avaliação da importância de cada variável para o modelo suporta-se em três estratégias: i) no cálculo da taxa de omissão, ii) na técnica de *jackknifing*, iii) e no cálculo da Área Abaixo da Curva (AAC). A avaliação através do processo de *jackknifing* apoia-se no peso que o algoritmo, baseado no princípio da máxima entropia, atribui a cada uma das variáveis para a previsão do total das ocorrências conhecidas (100%), permitindo assim posicionar relativamente a variável *tipos de vegetação* em relação às restantes variáveis. Já a taxa de omissão, sendo um tipo de erro, traduz a incapacidade dos modelos para preverem corretamente as ocorrências conhecidas (cicatrizes), discriminando condições favoráveis de condições menos favoráveis à ocorrência

destes movimentos em massa. Para tal, realizou-se uma partição das ocorrências conhecidas (deslizamentos) com base num processo de seleção aleatória, permitindo a criação de dois subconjuntos de dados, um direcionado à calibração dos modelos (70%) e outro para avaliação dos mesmos (30%), sendo com base neste segundo subconjunto que é calculada a taxa de omissão. No que respeita às variáveis ambientais ou preditivas, enquanto um modelo recebeu todas as variáveis, nos outros modelos o processo de calibração excluiu algumas variáveis, como a variável *tipo de vegetação e uso do solo*, de forma a comparar o desempenho destes modelos nas duas situações, com e sem a variável². No caso específico do *tipo de vegetação e uso do solo*, a comparação do valor de taxa de omissão dos modelos que a incluem ou excluem, permitirá averiguar a importância que esta variável assume na capacidade preditiva dos modelos. Como o cálculo da taxa de omissão pressupõe a transformação da escala de probabilidades (valores de 0 a 1) em escala binária (favorável, desfavorável), foi utilizado como limiar o valor que em cada modelo valoriza mais a capacidade do modelo para classificar corretamente os pixels onde se conhecem cicatrizes que a capacidade para classificar corretamente os pixels onde não estão identificadas cicatrizes³. Além da taxa de omissão, cujo propósito é avaliar o contributo da variável *tipos de vegetação* para a capacidade preditiva dos modelos, foi ainda avaliado o desempenho dos modelos, também conhecido como capacidade discriminatória, com base na medida de precisão Área Abaixo da Curva (AAC), a qual não está dependente da definição de um limiar.

Variáveis

As variáveis de natureza topográfica são das mais utilizadas para a avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos em massa (Lee *et al.*, 2007; Piedade, 2009; Reis *et al.*, 2015), sendo um número significativo de variáveis deste tipo derivadas

² A variável geologia não foi incluída no processo de modelação, uma opção suportada nos resultados da análise estatística exploratória e na fraca desagregação ao nível de categorias desta variável.

³ Não foi utilizado o valor associado à probabilidade mais baixa atribuída aos pontos utilizados no processo de calibração pelo facto de alguns pixels serem apenas afetados marginalmente, e as suas condições potencialmente estarem afastadas das condições favoráveis à ocorrência de deslizamentos.

de modelos digitais de terreno (MDT). A sua utilidade tem sido demonstrada, dada a correlação encontrada com a ocorrência deste tipo de eventos (Lee & Min, 2001; Piedade *et al.*, 2010). No entanto, a sua utilidade está muito dependente da resolução utilizada, a qual pode mascarar as relações que existem na realidade. A resolução base das variáveis utilizadas nesta análise é de 10x10m, no entanto, e uma vez que a resolução é importante, neste trabalho foram criadas variáveis que se baseiam em diferentes resoluções, de forma a reproduzir o mais fielmente possível a complexidade das condições topográficas da área em estudo, e assim reduzir-se o enviesamento dos resultados produzidos por uma resolução pouco adequada. No caso do declive, sendo considerada uma variável determinante para a ocorrência de deslizamentos, e tendo em conta a variação de declive que pode ocorrer numa célula de 10x10m face à elevada complexidade topográfica do relevo da ilha, as variáveis *declive médio* e *variação do declive* (valor máximo – valor mínimo) foram obtidas a partir de um MDT de resolução 1x1m. No caso das variáveis em que cada pixel está classificado com base no comportamento altimétrico dos pixels vizinhos (posição na vertente, desvio à altitude média, perfil transversal e plano de curvatura), teve-se por referência uma janela de análise de 5x5 pixels na resolução 10x10m (TABELA I).

A variável *desvio à altitude média* procura medir a posição topográfica de um pixel central (z_0) em relação aos seus vizinhos com base no índice de posição topográfica e no desvio padrão da altitude (Gallant & Wilson, 2000), e ainda que possa representar uma duplicação de informação em relação à variável *posição na vertente*, foi identificada como mais precisa em termos de resultados (De Reu *et al.*, 2013).

A variável *plano de curvatura* faz referência à morfologia de um determinado sector de vertente no plano longitudinal, o que acaba por fazer referência às condições topográficas que controlam a drenagem, nomeadamente a existência de variações no perfil longitudinal. Já a variável *perfil transversal* das vertentes permite avaliar indiretamente a importância da morfologia e dimensão dos sistemas de drenagem, nomeadamente ao nível da tensão registada em função da rugosidade do terreno no sentido perpendicular à drenagem.

No que diz respeito a condições edáficas, grande parte do território da bacia está classificado como *terreno acidentado*. Sendo uma categoria de natureza topográfica, limita a real clarificação das condições do solo como determinantes à suscetibilidade de movimentos de vertente.

TABELA I - Variáveis em uso e respetivas categorias⁴.

TABLE I - Variables in use and categories.

Tipo de variável	Variável	Categorias
Topográfica	Posição na vertente ⁵	Topo, Setor intermédio, Setores planos, Base da vertente, Vale / talvegue
	Exposição	N, NE, E, SE, S, SO, O, NO NO, O, SW, plano
	Declive médio (°)	0-9, 9-21, 21-29, 29-36, 36-42, 42-51, >51
	Desvio à altitude média ⁶	-1.7 a -0.5; -0.5 a -0.2; -0.2 a 0; 0 a 0.2; 0.2 a 0.5; >0.5
	Variação do declive (°)	0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80
	Perfil transversal da vertente	< -4.1, -4.1 a -1.1, -1.1 a 1.2, 1.2 a 4.4, > 4.4
	Plano de curvatura da vertente	< -4.9, -4.9 a -2.4, -2.4 a -0.67, -0.67 a 0.73, 0.73 a 2.6, > 2.6
Vegetação e uso do solo	Tipo de vegetação e uso do solo	acac (acacial), agr (área agrícola), eucab (eucaliptal aberto), eucfec (eucaliptal fechado), eucpin (eucaliptal com pinheiro bravo), euphorb (comunidade de figueira do inferno - Euphorbia piscatoria), gieab (giestal aberto), giefec (giestal fechado), herb_past (comunidades herbáceas associadas a áreas abandonadas pelo pastoreio – estruturadas por Agrostis castellana), herb_agr (comunidades herbáceas associadas a áreas abandonadas pela agricultura – estruturadas por gramíneas exóticas), laurab (laurissilva aberta), pinab (pinhal aberto), pinfec (pinhal fechado), praia, ribeira, salg (salgueiral), salgab (salgueiral aberto), soutab (souto aberto), soutfec (souto fechado), tojfec (tojal fechado), urb (área urbana), urzab (urzal aberto), urzfec (urzal fechado)
Condições edáficas ⁷	Tipo de solo	vertisolo, phaeozem, cambisol, andosolo, terreno acidatado
	Textura do solo	fina / terreno acidatado, argila agregada, franco arenoso, franca, franco-siltoso
Geologia ⁸	Geologia	CVP: Complexo vulcânico principal, CVS: Complexo vulcânico São Roque - Paul

⁴ As variáveis quantitativas foram convertidas em variáveis categóricas. Enquanto que a definição de classes de exposição se baseou num intervalo padrão (45°) respeitando a organização dos diferentes quadrantes, a definição de classes para as restantes variáveis topográficas respeitou os intervalos naturais.

⁵ O cálculo da variável posição na vertente segue a proposta de Jenness (2006), e baseia-se no índice de posição topográfica: <http://www.jennessent.com>

⁶ O cálculo desta variável segue a proposta descrita em Reu *et al.* (2013).

⁷ Fonte: Carta dos Solos da Ilha da Madeira, escala 1:100 000, Secretaria Regional de Economia da Região Autónoma da Madeira, CEP/ISA/CPUTL/DRAM, 1992.

⁸ Fonte: Carta Geológica de Portugal – Ilha da Madeira (Folhas A e B), escala 1:50 000, Serviços Geológicos de Portugal, 1975.

Resultados e Discussão

A aluvião de 20 de fevereiro de 2010 ocorre na sequência de um evento de precipitação intensa, enquadrado num inverno especialmente pluvioso. Além dos totais de precipitação acumulada entre outubro de 2009 e fevereiro de 2010 superarem os 1000mm, nalguns dias anteriores, e no dia 20 de fevereiro, a precipitação diária superou os 100 mm. No dia 20, além dos elevados totais registados, a intensidade revelou-se um fator determinante, pois nalgumas áreas o total de precipitação foi de 60mm em 30 minutos (EARAM, 2010). Além dos aspetos climáticos, as condições topográficas terão tido um papel relevante. Uma das características desta aluvião foi a importante carga sólida transportada, alimentada a montante por um número significativo de movimentos de vertente, nomeadamente escoadas lamacentas e deslizamentos translacionais de carácter lamacente.

Terá o tipo de vegetação sido um fator diferenciador na suscetibilidade à ocorrência destes movimentos de vertente?

Avaliação da suscetibilidade com base em parâmetros estatísticos

A avaliação da existência de associação com base no teste estatístico do qui-quadrado permitiu confirmar a existência de uma associação significativa entre o tipo de vegetação e a ocorrência de movimentos de vertente, a qual se revelou mais forte (V de Cramer) que nas outras variáveis (fig. 2). Os valores de significância do qui-quadrado indicam que a probabilidade de a relação identificada entre as variáveis categóricas e a ocorrência destes movimentos se dever a condições aleatórias é muito baixa, inferior a 1%.

Estes valores são confirmados pelos resultados obtidos pela avaliação da suscetibilidade, através do Likelihood ratio, para cada uma das classes das variáveis em uso. A ideia de que o tipo de vegetação pode ter um papel importante no condicionamento da suscetibilidade ganha consistência quando se confirma que alguns tipos de vegetação apresentam os valores de suscetibilidade mais elevados comparativamente às categorias das outras variáveis.

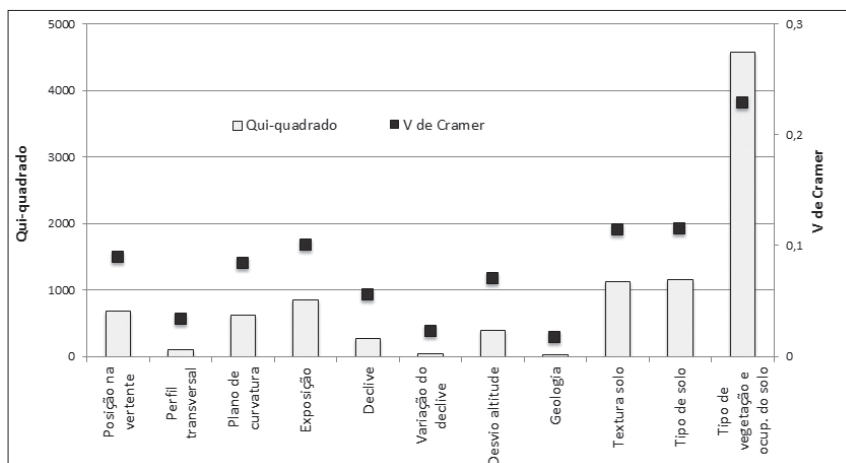


Fig. 2 - Valores de qui-quadrado e V de Cramer obtidos para cada variável.
Fig. 2 - Pearson's Chi-Square Test and Cramer's V results for each variabile.

Ao nível das variáveis de natureza topográfica, a variável plano de curvatura assume valores acima da média em diferentes categorias, estando todas associadas a diferentes graus de concavidade topográfica. Estes resultados estão em sintonia com os valores obtidos na variável posição na vertente, onde os valores de suscetibilidade superiores à média são identificados para os sectores posicionados em vales e talwegues (fig. 3).

Esta tendência verifica-se também na variável perfil transversal, pois os valores de suscetibilidade são superiores à média da bacia nas categorias que incluem as áreas classificadas como côncavas (> 1.2)⁹. Estes valores são compatíveis com as situações descritas noutros casos de estudo, onde as cicatrizes de arranque estão normalmente associadas a pequenas depressões (ver Sidle & Terry, 1992), em áreas onde os solos são normalmente mais profundos e a infiltração está favorecida.

Em termos de declive, verifica-se que não há uma correlação direta entre o declive médio e a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos. A classe que identifica os valores mais elevados de declive (>51°) não apresenta os valores de suscetibilidade

⁹ O valor médio de suscetibilidade para a bacia, considerando todas as categorias de todas as variáveis, está representado graficamente através da linha a tracejado. The mean value for the basin, considering the categories of all variables, is identified in the chart by a dashed line.

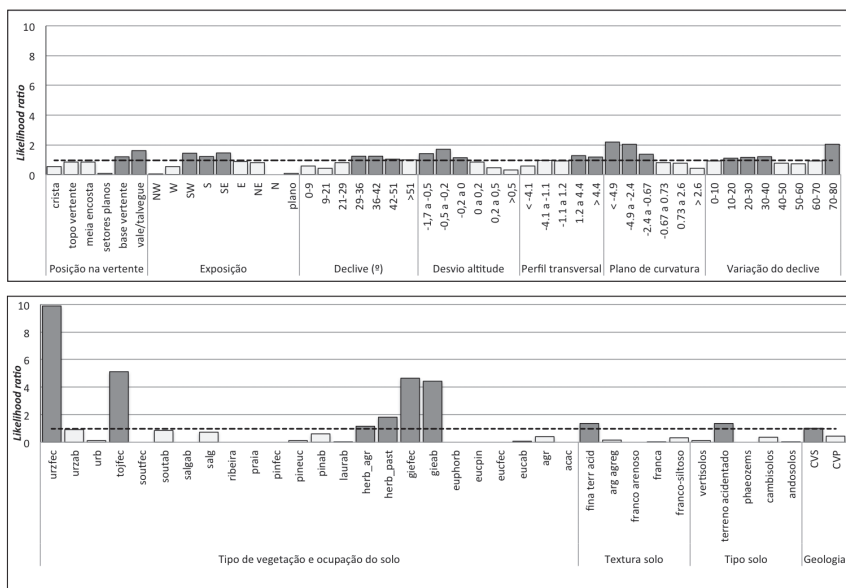


Fig. 3 - Likelihood ratio obtido para as categorias de cada variável.

Fig. 3 - Likelihood ratio for the categories of each variable.

mais elevados. Os valores mais elevados são identificados em áreas com declive entre 29° e 42°. Já considerando a *variação do declive*, essa relação é mais evidente, pois as áreas onde há maior variação são as que apresentam os valores de suscetibilidade mais elevada. Esta associação coloca em evidência a importância que a variação do declive tem no desencadeamento deste tipo de movimentos em massa. Na verdade, em campo é comum que a cicatriz de arranque se instale na base de paredes ou afloramentos rochosos, na presença de rupturas de declive.

Em termos de exposição, verifica-se que as vertentes expostas ao quadrante sul apresentam valores de suscetibilidade mais elevados. Este resultado pode estar associado ao facto de o quadro sinótico em que estes eventos ocorrem estar estruturado por um sistema depressionário com trajetória de sudoeste, uma situação comum em episódios de precipitação intensa que originam aluviões na face sul da ilha (Maciel, 2005).

Já no que diz respeito à variável *tipo de vegetação e ocupação do solo*, verifica-se que as comunidades arbustivas apresentam os valores mais elevados em termos de

suscetibilidade. A suscetibilidade mais elevada foi identificada em urzais fechados, um resultado inesperado tendo por referência resultados publicados anteriormente (Figueiredo *et al.*, 2013). Mas quando se avaliam as condições em que este tipo de vegetação se encontra, verifica-se que o grau de suscetibilidade não está dado por condições inatas (fisionomia, estrutura ou composição florística), mas sim por condições externas. Trata-se de uma pequena mancha instalada num sector de base de vertente, no contacto com o leito da ribeira principal, e na imediata proximidade da confluência de vários tributários que canalizam o caudal das cabeceiras dominadas por formações herbáceas e alguns giestais. Esta posição explica os elevados valores de suscetibilidade obtidos. Tal como se pode constatar pela análise dos resultados, em termos topográficos os sectores de base de vertente e os talvegues/leitos de ribeira são os que apresentam a maior suscetibilidade. Na verdade, correspondem frequentemente a áreas que sofrem processos de arranque de material associados ao processo de transporte, tratando-se muitas vezes de áreas coincidentes com o pé do deslizamento. No caso dos leitos de ribeira, é frequente que as escoadas solifluxivas de detritos, alimentadas por material das vertentes, devido à sua grande capacidade de transporte, arranquem material das margens. No caso do urzal fechado, estas dinâmicas explicam os resultados de suscetibilidade obtidos. No contexto deste episódio de aluvião, é evidente o alargamento dos leitos das ribeiras nas áreas de cabeceira por erosão das margens, tal foi a capacidade erosiva. Mas a combinação de fatores descrita não permite explicar os valores de suscetibilidade obtidos para as outras comunidades arbustivas presentes, como o tojal (*tojfec*)¹⁰, e os dois tipos de giestal (*giefec*, *gieab*). Os deslizamentos registados em giestais, abertos (*gieab*) ou fechados (*giefec*), ocorrem em condições de declive diversas (fig. 4), o que, à semelhança das comunidades herbáceas instaladas em áreas que estiveram sujeitas ao pastoreio, indica que as condições específicas destes tipos de vegetação são mais favoráveis à ocorrência de deslizamentos. No caso dos giestais, uma vez que os valores de suscetibilidade se posicionam acima da média em ambas as categorias, isto indica que não é a estrutura (aberta ou fechada) que é determinante, ainda que o valor

¹⁰ O tojo, mais especificamente o *taxon Ulex europaeus L. subsp. latebracteatus* (Mariz) Rothm., é localmente designado por carqueija.

de suscetibilidade seja mais elevado em comunidades abertas. O que remete para particularidades associadas ao tipo de arbusto. Neste caso, as giestas apresentam uma baixa densidade radicular, sendo evidente a escassez de raízes finas, uma estrutura pouco ramificada e superficial (Chmelíková & Hejcman, 2012). Este atributo pode estar a desempenhar um papel determinante no aumento da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente, pois a escassez de raízes finas promove uma redução da resistência, pelo que um aumento da tensão tangencial, promovida, por exemplo, pelo aumento da quantidade de água no solo em contexto de episódios de precipitação sucessivos, promoverá uma redução mais rápida da resistência ao movimento. Dadas as semelhanças estruturais e fisionómicas que existem entre os giestais e os urzais, as diferenças ao nível dos sistema radicular podem ser o fator diferenciador em termos de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos. Os urzais abertos, que em teoria terão uma suscetibilidade superior aos urzais fechados (Figueiredo *et al.*, 2013), situação que não se confirma nesta bacia pelas razões já expostas, apresentam um valor de suscetibilidade consideravelmente inferior aos giestais. Este facto pode ser explicado pela maior densidade do sistema radicular das urzes. Além das raízes estruturais, estes arbustos apresentam uma densidade significativamente superior de raízes finas, o que contribui para aumentar a tensão normal, aumentando a resistência e reduzindo a sua suscetibilidade aos movimentos de vertente. Além das diferenças em termos de sistema radicular, acresce ainda o facto de os giestais estarem dominados por leguminosas, tal como os tojais, um grupo de organismos referenciado como muito frequente em áreas afetadas por deslizamentos (Walker & Shiels, 2012).

No que diz respeito às comunidades herbáceas, e tendo em conta especificamente as associadas a áreas que estiveram sujeitas ao pastoreio (*herb_past*) durante vários séculos nas cabeceiras da bacia, verifica-se que os valores de suscetibilidade são inferiores aos esperados, facto que pode estar condicionado pelo facto de este tipo de vegetação ocupar áreas significativas em setores de declive inferior à média da bacia. Estas comunidades, apesar de não apresentarem os valores de suscetibilidade mais elevados (fig. 3), registam os valores mais elevados de área afectada por deslizamentos, sendo neste tipo de vegetação onde se encontra o maior número de cicatrizes de arranque correspondentes a situações de cabeceiras dos deslizamentos. Ou seja,

com grande frequência os deslizamentos tiveram início neste tipo de vegetação. É também este um dos tipos de vegetação onde as áreas afetadas por deslizamentos apresentam maior diversidade de condições de declive (fig. 4)¹¹.

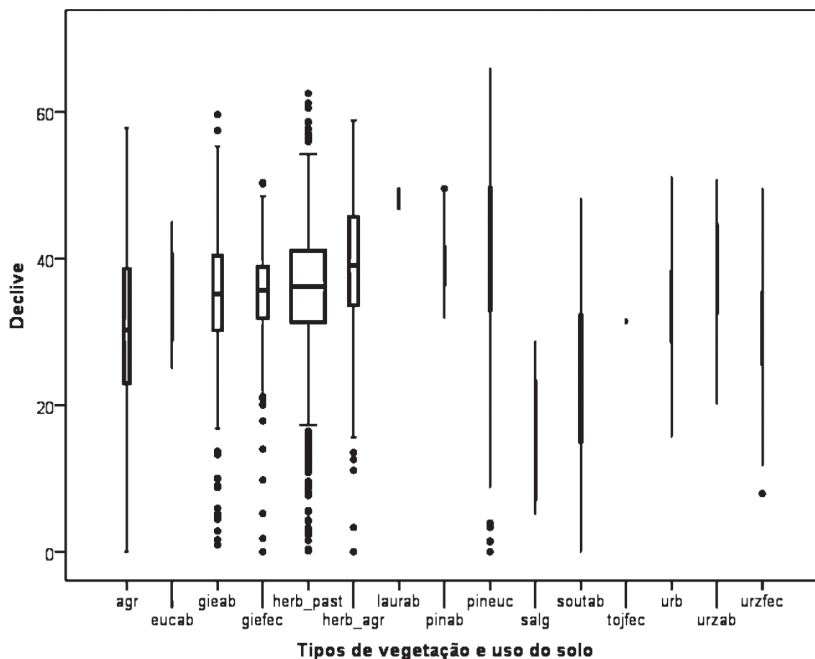


Fig. 4 - Variação das condições de declive nas áreas afetadas por deslizamentos em diferentes tipos de vegetação e uso do solo.

Fig. 4 - Slope variation on areas affected by landslide according vegetation type and land use.

Como este tipo de vegetação ocupa uma área significativa no sector de cabeceiras em áreas de fraco declive, e mesmo assim o número de deslizamentos é superior neste tipo de vegetação, pode então inferir-se que os atributos deste tipo de vegetação são importantes para explicar o padrão de deslizamentos nos sectores de cabeceiras. Na verdade, se considerarmos apenas a cabeceira dos deslizamentos, verifica-se que um

¹¹ Na fig. 4, a largura das colunas, entre o percentil 25 e o percentil 75, são proporcionais ao número de pixels associados a áreas afectadas por deslizamento em cada tipo de vegetação.

número significativo está instalado em comunidades herbáceas. Esta situação explica-se pelo facto de em comunidades herbáceas a força de coesão promovida pelo sistema radicular ser depreciável, principalmente se comparada com as comunidades arbustivas e arbóreas (Sidle & Terry, 1992). No caso da área em estudo, os valores de suscetibilidade inferiores nas comunidades herbáceas associadas ao pastoreio, comparativamente aos giestais, podem explicar-se pelo facto de grande parte das áreas ocupadas por este tipo de comunidades (60%) se encontrar em sectores com declive inferior à média da bacia (36°). Além da menor competência do sistema radicular destas comunidades para aumentar a resistência a movimentos em massa, este tipo de vegetação resulta de um processo de perturbação que se prolongou por séculos, e que cessou apenas recentemente. E os tipos de vegetação que resultam de um processo de perturbação recente estão referenciados como sendo mais suscetíveis à ocorrência deste tipo de eventos, principalmente no caso de se tratar de comunidades tendencialmente monoespecíficas (Walker & Shiels, 2012), o que remete para a importância que pode ter uma comunidade multiestratificada e floristicamente diversa, pelo facto de favorecer um sistema radicular multiestratificado. Efetivamente, na bacia em estudo, os tipos de vegetação com suscetibilidade mais elevada são comunidades tendencialmente monoespecíficas, cujos atributos estão muito determinados pela existência de processos de perturbação recente. É também o caso dos giestais e tojais instalados em áreas onde o pastoreio foi reduzido ou praticamente eliminado.

Em relação às variáveis *tipo de solo*, *textura do solo* e *geologia*, a fraca desagregação categórica das classificações ou a existência de classes ambíguas promove o enviesamento dos resultados de suscetibilidade obtidos. Em termos de tipo de solo e textura, a existência de uma classe que se refere a condições topográficas, e não edáficas, como é o caso da classe *terreno acidentado*, reduz o poder explicativo destas variáveis. Sendo esta a categoria que apresenta um valor de suscetibilidade superior à média, não é possível aferir de que forma os atributos do meio edáfico condicionam a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos, uma vez que o critério que suporta a definição desta classe se baseia em informação que já está considerada nas variáveis de natureza topográfica. Esta limitação sai reforçada pelo facto desta categoria ocupar uma área muito significativa na bacia (70%), e é precisamente nesta classe que ocorrem 97% dos registos de deslizamento. Sendo assim, e uma

vez que não se conhecem as condições edáficas predominantes em parte significativa da bacia, não é possível avaliar de que forma o tipo de solo tem influência no desencadeamento de deslizamentos. Esta situação mantém-se no caso da geologia, onde a falta de desagregação pode também estar a promover os resultados obtidos.

O papel da vegetação segundo a modelação preditiva

A importância que a modelação preditiva atribui à variável *tipos de vegetação e uso do solo* vem confirmar os resultados obtidos com base na análise estatística exploratória. A aplicação do método de *jackknifing*, com vista a identificar as variáveis com maior poder explicativo a partir do algoritmo baseado no princípio de máxima entropia, permite confirmar que a variável *tipo de vegetação* assume uma capacidade preditiva na explicação do padrão de deslizamentos superior a qualquer outra variável em uso. De todas as variáveis consideradas, o *tipo de vegetação e uso do solo* é a única que permite a produção de um modelo (modelo 5), se utilizada isoladamente, com boa capacidade discriminatória (AUC = 0.77), permitindo prever corretamente um número significativo dos deslizamentos registados e obter mesmo a mais baixa taxa de omissão (TABELA II). Aliás, a adição de todas as outras variáveis ao modelo permite melhorar apenas ligeiramente a sua capacidade preditiva, enquanto que a não utilização da variável *tipo de vegetação e uso do solo* (veget) reduz significativamente a capacidade preditiva dos modelos, aumentando a taxa de omissão (TABELA II).

Em termos de espacialização dos resultados, torna-se clara a importância que os modelos atribuem à variável *tipo de vegetação e uso do solo*, uma vez que o padrão de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos está fortemente estruturado pela definição espacial desta variável. Esta associação está ainda confirmada pelo facto de o modelo 1 apresentar um padrão muito semelhante ao modelo 5, estando o primeiro calibrado com todas as variáveis e o segundo apenas com a variável vegetação (fig. 5).

Acresce ainda que estes são os modelos classificados como tendo o melhor desempenho em termos de capacidade para identificar as áreas mais suscetíveis à ocorrência

TABELA II - Contribuição das diferentes variáveis para cada modelo e resultados da avaliação de cada modelo.

TABLE II - Contribution of each variable for each model and evaluation results.

Modelo	Contribuição das variáveis para os diferentes modelos (%)										Avaliação	
	Posição	Exposição	Declive	Varição	Perfil	Curvatura	Desvio	Solo_te	Solo_ti	Veget	AAC	To
1	10	12.4	0.5	0.4	0.8	0.6	0.5	18.5	4.8	51.6	0.8	0.19
2	17.8	34.2	1.2	0.7	2	1	1	33	9	*	0.7	0.25
3	14	12.8	1	1	1.2	0.7	0.7	*	*	69	0.8	0.21
4	34.1	50.5	5.2	3.1	3.3	1.5	2.4	*	*	*	0.7	0.42
5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	100	0.8	0.15

Legenda: Posição na vertente (Posição), Variação do declive (Variação), Perfil transversal da vertente (Perfil), Plano de curvatura da vertente (Curvatura), Desvio à altitude média (Desvio), Textura do solo (Solo_Te), Tipo de solo (Solo_ti), Tipo de vegetação e ocupação do solo (Veget); Área abaixo da curva (AAC), Taxa de omissão (To); * a variável não foi utilizada neste modelo. Nota: para o cálculo da taxa de omissão teve-se por referencia o valor de limiar que em cada modelo valoriza mais a capacidade do modelo para classificar corretamente os pixéis onde se conhecem cicatrizes que a capacidade para classificar corretamente os pixéis onde não estão identificadas cicatrizes.

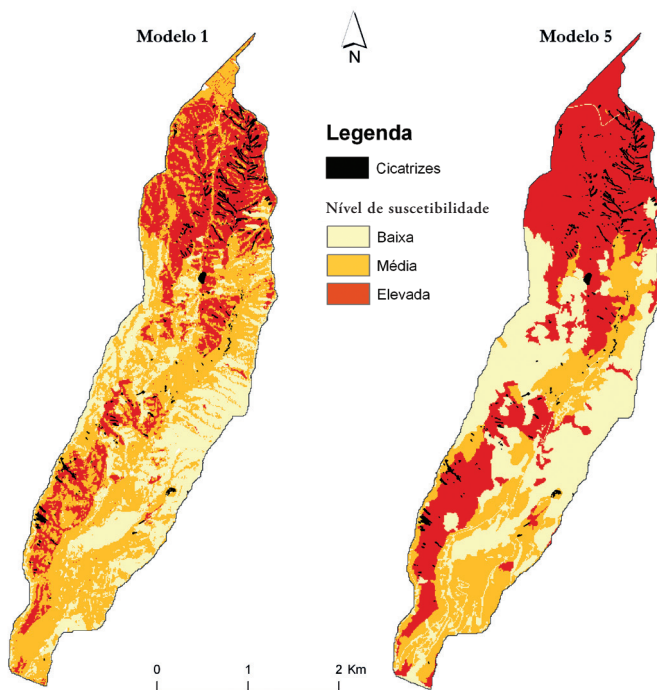


Fig. 5 - Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na area em estudo.

Fig. 5 - Susceptibility to landslide in the study area.

de deslizamentos, considerando que conseguem prever de forma bastante satisfatória a maior parte dos deslizamentos registados aquando da aluvião de 20 de fevereiro. No entanto, e com base na comparação dos modelos com melhor desempenho, verifica-se que o modelo 1, que inclui informação para todas as variáveis, apresenta maior detalhe na classificação da suscetibilidade territorial, facto que se deve principalmente à inclusão das variáveis de natureza topográfica, as quais, sem dúvida, são importantes no condicionamento do grau de suscetibilidade. Na verdade, e tendo por referência o sector de cabeceiras, o sector da bacia com valores de suscetibilidade mais elevados, a inclusão de informação de natureza topográfica permite reduzir o valor de suscetibilidade para *média* nalgumas áreas, uma vez que no modelo 5, que considera apenas o tipo de vegetação, toda a área aparece como tendo suscetibilidade elevada. Trata-se efetivamente da área da bacia dominada por formações herbáceas, associadas a áreas de pastoreio, e formações arbustivas, nomeadamente giestais. Assim sendo, no que diz respeito aos tipos de vegetação, os resultados da modelação preditiva confirmam que os valores mais elevados, ou acima da média da bacia, estão identificados nas mesmas classes de vegetação identificadas ao nível da análise estatística: giestais abertos, giestais fechados, comunidades herbáceas associadas ao pastoreio, urzal aberto e urzal fechado (6, 7, 8, 22, 23 no respetivo gráfico da fig. 6).

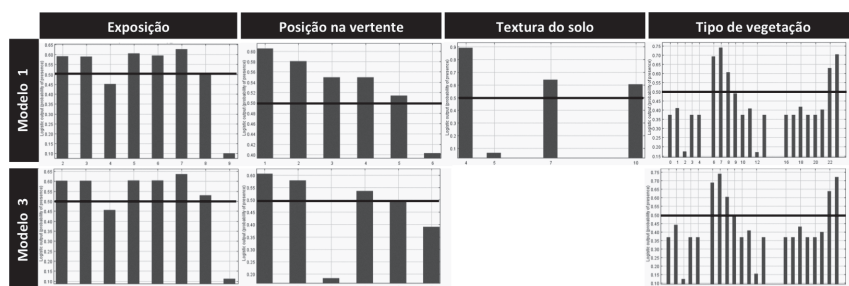


Fig. 6 - Probabilidade de ocorrência de deslizamentos em cada categoria¹².

Fig. 6 - Probability to landslide for the categories of the different variables.

¹² Nota: a linha horizontal identifica o valor 0.5, valor a partir do qual a probabilidade de ocorrência é significativa.

Solid horizontal line in the charts identifies the value 0.5, value above which the probability of occurrence is significant.

Esta situação verifica-se em todas as outras variáveis, o que permite a validação cruzada dos resultados obtidos através das duas estratégias, permitindo confirmar o papel preponderante que o tipo de vegetação tem no condicionamento da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos.

Conclusão

Os resultados obtidos permitem confirmar que as condições fisionómicas e a composição florística das comunidades vegetais condicionam a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia da ribeira da Tabua. Sem dúvida que as condições topográficas são determinantes, no entanto, os resultados obtidos confirmam a necessidade de incluir os atributos da vegetação nos processos de análise de suscetibilidade. Tal como foi registado anteriormente (Figueiredo *et al.*, 2013), as comunidades herbáceas instaladas em áreas associadas historicamente ao pastoreio e as comunidades arbustivas dominadas por espécies exóticas (giestas, tojo) apresentam valores superiores à média da bacia. Mas no caso específico da bacia da Tabua, os urzais fechados, comunidades nativas, também fazem parte do grupo de tipos de vegetação com valores de suscetibilidade superiores à média da bacia. Verifica-se, no entanto, que as cabeceiras das cicatrizes não se instalam neste tipo de vegetação, sendo que os urzais são mais afetados pelo arranque de material associado ao processo de transporte, facto que está determinado pela sua posição, mais frequentemente em talvegues ou na proximidade do leito de ribeira. Um outro factor que promove tão elevados valores de suscetibilidade está relacionado com a sua muito baixa representatividade na bacia. Este resultado remete para a necessidade de haver uma análise cuidada dos resultados no sentido de diferenciar situações em que os atributos da categoria são determinantes, ou se, pelo contrário, os valores traduzem a combinação de fatores externos que espacialmente fomentam um aumento das condições de suscetibilidade. Este resultado remete para o facto de este tipo de análise ganhar em rigor se houver uma prévia diferenciação dos sectores de cada deslizamento (cabeceiras, corpo, pé), no sentido de avaliar melhor quais os tipos de vegetação que verdadeiramente estão na origem destes movimentos.

Em relação a outras variáveis, apesar de a análise estatística indicar a existência de relações significativas para determinadas categorias, a análise criteriosa das diferentes classes permite confirmar que pode estar a verificar-se um efeito de enviesamento dos resultados decorrente dos critérios que suportam a classificação associada a cada variável. Esta situação verifica-se no caso das variáveis associadas às condições edáficas (*tipo de solo, textura do solo*) e geologia.

Além da componente topográfica e padrão climático, os resultados permitem afirmar que a vulnerabilidade perante os episódios de aluvião na Ilha da Madeira pode estar a ser reforçada pela alteração das condições da vegetação, uma vez que os tipos de vegetação com valores mais elevados de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos resultam de uma degradação profunda das condições da vegetação nativa. Para tal muito contribuiu o uso pastoril em parte significativa do sector de cabeceiras da bacia, à semelhanças dos sectores de maior altitude da ilha, onde o uso do fogo era utilizado para controlo das plantas arbustivas e rejuvenescimento das pastagens, configurando uma combinação deletéria de fatores para a recuperação da vegetação lenhosa nativa. Este cenário motivou historicamente a escassez de lenha, favorecendo a sementeira de espécies exóticas de crescimento rápido, como as giestas, que hoje ocupam áreas significativas. Juntamente com os impactes do uso agrícola e reflorestação com exóticas, deu-se origem a uma paisagem vegetal que se afasta profundamente das condições potenciais da vegetação natural. Além de todos os reflexos negativos associados do ponto de vista da biodiversidade, os resultados deste trabalho permitem confirmar o reforço da vulnerabilidade aos episódios de aluvião em resultado de uma aumento da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos associada a episódios de precipitação intensa na Ilha da Madeira.

Referências bibliográficas

- Baioni, D. (2011). Human activity and damaging landslides and floods on Madeira Island. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11 (11): 3035-3046.
- Capelo, J., Sequeira, M., Jardim, R., Costa, J.C. (2004). Guia da excursão geobotânica dos V Encontros ALFA 2004 à Ilha da Madeira. *Quercetia* 6: 5-46.
- Chmelíková, L., Hejcman, M. (2012). Root system variability in common legumes in Central Europe. *Biologia* 67 (1): 116-125.

- De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., Chu, W., Antrop, M., De Maeyer, P., Finke, P., Van Meirvenne, M., Verniers, J., Crombé, P. (2013). Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology* 186: 39-49.
- EARAM - SECRETARIA REGIONAL DO EQUIPAMENTO SOCIAL (2010). *Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira*. Funchal, 316 págs.
- Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. McC., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K. S., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberon, J., Williams, S., Wisz, M. S. and Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29 (2): 129-151.
- Fernández-Palacios, J. M., de Nascimento, L., Otto, R., Delgado, J. D., García-del-Rey, E., Arévalo, J.R., Whittaker, R.J. (2011). A reconstruction of Palaeo-Macaronesia, with particular reference to the long-term biogeography of the Atlantic island laurel forests. *Journal of Biogeography* 38 (2): 226-246.
- Figueiredo, A. (2008). Desempenho de um modelo de máxima entropia na previsão da distribuição do endemismo Euphorbia piscatoria na Ilha da Madeira. *Cadernos de Geografia* 26/27: 351-359.
- Figueiredo, A., Pupo-Correia, A., Sequeira, M.M. (2013). Suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos em diferentes tipos de vegetação na Ilha da Madeira, in: Nunes, A., Cunha, L., Santos, J., Ramos, A., Ferreira, R., Paiva, I., Dimuccio, L. (Eds.), VI Congresso Nacional de Geomorfologia. Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Universidade de Coimbra, pp. 115-118.
- Gallant, J.C., Wilson, J.P. (2000). Primary topographic attributes. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, New York, pp. 51-85.
- Lee, S., Min, K. (2001). Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology* 40 (9): 1095-1113.
- Lee, S., Ryu, J. H., Kim, I. S. (2007). Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea. *Landslides* 4 (4): 327-338.
- Maciel, O. M. G. (2005). *Precipitações intensas na Ilha da Madeira : incidência, contrastes espaciais e causas sinópticas*. Tese de Mestrado, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Coimbra, 171 p.
- Nunes, A., Figueiredo, A., Almeida, A. C. (2012). The effects of farmland abandonment and plant succession on soil properties and erosion processes: a study case in centre of Portugal. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território* 2: 165-190.
- Pedrosa, A. D. S., Pereira, A. (2011). A integração das formações superficiais na modelação e cartografia do risco geomorfológico: o caso da serra do Marão. *Soc. & Nat.* 23 (3): 529-544.
- Piedade, A. (2009). *Modelação espacial em sistemas de informação geográfica da suscetibilidade a deslizamentos na área de Lousa-Loures* (Tese de Mestrado). Gestão do Território, área de especialização em Deteção Remota e Sistemas de Informação Geográfica, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 113 p. + anexos.
- Piedade, A., Zezere, J. L., Garcia, R. A. C., Oliveira, S.C. , (2010). Avaliação e validação de modelos de suscetibilidade a deslizamentos em áreas homogéneas na região a Norte de Lisboa, 16º Congresso da APDR - *Regiões de Charneira, Canais de Fronteira e Nós*, Universidade da Madeira, Funchal, pp. 1318 - 1333.

- Policarpo, N. O. D. S. G., Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa (2012). *Suscetibilidade aos movimentos de vertente e vulnerabilidade no concelho do Funchal*. Relatório de Estágio, Lisboa, 112 p.
- Quintal, R. (1999). Aluviões da Madeira. Séculos XIX e XX. *Territorium* 6: 31 - 48.
- Ramalheira, A., Portela, M. M., Almeida, A. B. D. (2014). Classificação de precipitações associadas a aluviões na região do Funchal, Ilha da Madeira, com recurso a cadeias de Markov, in: Lourenço, L. (Ed.), *VIII Encontro Nacional de Riscos*. Imprensa da Universidade de Coimbra, Guimarães, p. 61-66.
- Reis, E., Bergonse, R., Simões, E., Filipe, P. (2015). Riscos hidrogeomorfológicos. In: Gomes, A., Avelar, D., Santos, F.D., Costa, H., Garrett, P. (eds.), *Estratégia de adaptação às alterações climáticas da Região Autónoma da Madeira - Clima-Madeira*. Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais, Funchal, p. 2-31.
- Roxo, M. J. (1988). *Processos atuais de evolução de vertentes*. (Tese de Mestrado). Geografia Física, Universidade de Lisboa, Lisboa, 178 p.
- Santos, F.D., Miranda, P. (eds.) (2006). *Alterações climáticas em Portugal. Cenários, impactos e medidas de adaptação*. 1st ed, Gradiva, Lisboa, 505 p.
- Sépúlveda, S.M.F. (2011). *Avaliação da precipitação extrema na Ilha da Madeira* (Tese de Mestrado). Engenharia do Ambiente, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 112 p.
- Sidle, R. C., Terry, P. K. K. (1992). Shallow landslide analysis in terrain with managed vegetation. *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*. vol. 209. IAHS Publ., pp. 289 - 298.
- Silva, F. A., Menezes, C.A. (1998). *Elucidário Madeirense. Edição Fac-similada*. DRAC, Funchal.
- Tasser, E., Mader, M., Tappeiner, U. (2003). Effects of land use in alpine grasslands on the probability of landslides. *Basic Applied Ecology* 4: 271-280.
- Walker, L. R., Shiels, A. B. (eds.) (2012). *Landslide Ecology*, Cambridge University Press, Cambridge, 314 pp.
- Zêzere, J. L. S., de Brum Ferreira, A., Rodrigues, M. L.S. (1999). The role of conditioning and triggering factors in the occurrence of landslides: a case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology* 30 (1-2): 133-146.