

CARTOGRAFIA DE SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE INSTABILIDADES EM VERTENTES PARA A RESERVA ECOLÓGICA NACIONAL NO CONCELHO DE ALMADA

SLOPE INSTABILITY SUSCEPTIBILITY MAPPING OF ALMADA COUNTY FOR THE NATIONAL ECOLOGICAL RESERVE (REN)

Marques, Fernando; *Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia e Instituto Dom Luiz. Faculdade de Ciências, Campo Grande, edifício C6, 3º piso, 1749-016 Lisboa, Portugal, fsmarques@fc.ul.pt*

Queiroz, Sónia; *FCiências.ID, Campo Grande, Edifício C1, 3º piso, 1749-016 Lisboa Portugal, soniarebeloqueiroz@gmail.com*

Gouveia, Luís; *FCiências.ID, Campo Grande, Edifício C1, 3º piso, 1749-016 Lisboa Portugal, luisdinartegg@gmail.com*

Vasconcelos, Manuel; *ESRI Portugal, Rua Julieta Ferrão, 10 - 10º A, 1600-131 Lisboa, Portugal, manuel.vasconcelos@esri-portugal.pt*

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os estudos realizados para elaborar cartografia de susceptibilidade à ocorrência de instabilidades em vertentes, escarpas e arribas do concelho de Almada, para definição das áreas a incluir na Reserva Ecológica Nacional. Foram aplicados os métodos preconizados na lei, com modificações e melhoramentos desenvolvidos no decurso do trabalho, à totalidade do concelho de Almada (71 km²) e que incluíram: 1) Cartografia de susceptibilidade à ocorrência de instabilidades em vertentes utilizando o método estatístico do Valor Informativo, com os resultados da aplicação do modelo validados com o inventário de instabilidades construído para o efeito (458 ocorrências), através da utilização de curvas ROC, que forneceram valor de área abaixo da curva de 0,964. O mapa produzido foi objecto de um processo de generalização para ultrapassar os inconvenientes da cartografia baseada em píxeis de 5 m no terreno; 2) Cartografia de escarpas, incluindo áreas de protecção adjacentes à crista, definidas de acordo com a lei, e áreas de protecção junto ao sopé, definidas pela aplicação do ângulo de sombra calibrado com os principais desabamentos que ocorreram na área em estudo; 3) Cartografia de arribas e respectivas faixas de protecção ou salvaguarda, que foram baseadas em inventários sistemáticos de instabilidades em arribas ocorridas entre 1947 e 2010. Os resultados obtidos neste estudo, dos quais resultou proposta de áreas a incluir na figura de REN bruta, em apreciação, podem constituir um exemplo de boas práticas municipais para a prevenção de desastres naturais e o uso sustentável do território.

ABSTRACT

This paper presents the studies carried out to produce the susceptibility maps for the occurrence of instabilities in slopes, scarps and sea cliffs of the Almada County, to define the areas to be included in the National Ecological Reserve (REN). The methods recommended in the law, with modifications and improvements developed in the course of the studies, were applied to the entire municipality of Almada (71 km²) and included: 1) Slope instability mapping using the statistically based Information Value method validated with the landslide inventory using ROC curves, which provided an AAC=0.964. The map was object of a generalization process to overcome the inconveniences of the use of a pixel based approach. 2) Natural scarp mapping including setback areas near the top, defined according to the law and setback areas near the toe defined by the application of the shadow angle calibrated with the major rockfalls which occurred in the study area; 3) Sea cliffs mapping including two levels of setback zones near the top, and one setback zone at the cliffs toe, which were based on systematic inventories of cliff failures occurred between 1947 and 2010. The results obtained in this study, which supported a proposal of areas to include in the REN, may be considered as an example of good practice of the municipal authorities in terms of hazard prevention and safe and sustainable land use.

1 - INTRODUÇÃO

Há um consenso generalizado na comunidade científica de que as instabilidades em vertentes, escarpas e arribas são fontes principais de desastres naturais e um constrangimento importante para as actividades humanas em zonas propensas à ocorrência destes fenómenos. O conhecimento atual sobre o tema permite aplicar métodos eficientes para elaborar cartografias de susceptibilidade, que são contribuições sólidas para um uso mais eficiente do território, na perspectiva de prevenção dos efeitos dos desastres naturais e, consequentemente, uma contribuição para a definição de políticas de planeamento sustentável.

Neste contexto, a Lei da Reserva Ecológica Nacional Portuguesa (REN) foi criada em 1983 (Decreto-Lei 321/83) com o objetivo de proteger os recursos naturais solo e água, e também para prevenir desastres naturais, nomeadamente a instabilidade em vertentes e os perigos relacionados com a orla costeira. Apesar da designação "ecológica", a lei não incluía componentes ecológicas (biológicos) específicas, mas, apesar das suas várias deficiências e limitações conceptuais, provou ser um instrumento fundamental para o planeamento e ordenamento territorial, impedindo o uso indiscriminado e, muitas vezes, inadequado do território. Na sequência de uma pequena revisão em 1990 (Decreto-Lei 93/90), em 2008 a lei sofreu profunda revisão (Decreto-Lei 166/2008) que melhorou e clarificou o seu alcance e aplicação, proporcionando uma abordagem mais científica e tecnicamente apoiada para várias componentes da REN e para a correspondente cartografia. No tópico de prevenção de riscos, o trabalho realizado para melhorar radicalmente a lei foi iniciado com a produção de um manual para cartografia de riscos à escala municipal (Julião et al., 2009), a que se seguiu a publicação da lei, com as definições, métodos e critérios de cartografia aplicáveis às diferentes componentes da REN (Decreto-Lei 239/2012), que incluíram procedimentos de cartografia detalhados e separados para instabilidades de vertentes, escarpas e arribas costeiras.

Neste artigo são apresentados os métodos e resultados obtidos para a cartografia da REN para as figuras de instabilidade de vertentes (incluindo a susceptibilidade de vertentes e as escarpas e respectivas faixas de protecção) e as arribas e respectivas faixas de protecção ou salvaguarda no município de Almada, que foi realizada utilizando os critérios de lei com modificações introduzidas para melhorar a coerência e utilidade dos mapas produzidos, e também para aplicar procedimentos com base científica para aspectos não abrangidos pela legislação.

2 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

O município de Almada tem uma área total de cerca de 71 km², e está localizado a sul de Lisboa, sendo limitado a norte pelo estuário do rio Tejo, a oeste pelo Oceano Atlântico (Figura 1) e a sul e sudeste pelos concelhos de Sesimbra e Seixal. A estrutura geológica corresponde ao flanco norte do sinclinal de Albufeira composto por formações do Miocénico que inclinam 4º a 6º para SSE. As principais formações geológicas na área de estudo são, da mais antiga para a mais recente (Figura 1): a) 6 unidades do Burdigaliano (Miocénico), compostas maioritariamente por areias finas siltosas (MII), calcários brandos (MIII), argilas (MIVa), areias (MIVb), calcários brandos (MVa1) e areias (MVa2); b) 2 unidades do Langhiano (Miocénico), compostas principalmente por calcários brandos (MVa3) e areias e calcários brandos (MVb+c); c) 2 unidades do Serravalliano (Miocénico), compostas por argilas (MVIa), e areias e calcários pouco resistentes (MVIb+c); d) 1 unidade do Tortoniano (Miocénico) composta por areias finas siltosas (MVIIa+b); e) Areias siltosas do Pliocénico; f) Cascalheiras, areias e argilas do Pleistocénico; g) formações holocénicas, incluindo dunas, areias de praia, depósitos de vertente, aluviões e aterros (CMA/DEGAS, 2005; CMA/DEGAS e FCT/CEG, 2005).

Os traços mais marcantes do contexto geomorfológico incluem (Figura 1): a) As encostas escarpadas da margem esquerda do rio Tejo com altura máxima superior a 120 m, que são compostas por sucessões de escarpas cortadas nas camadas de calcários pouco resistentes, separadas por encostas mais suaves compostas pelas unidades argilosas e arenosas menos resistentes. Estas encostas são cortadas por linhas de água encaixadas com perfil longitudinal e flancos íngremes. b) A antiga arriba da Costa da Caparica com altura máxima superior a 80 m, que corresponde à área protegida da "Arriba Fóssil da Costa da Caparica". A antiga arriba é separada do oceano por uma planície de acumulação composta principalmente por dunas e areias de dunas, com uma largura máxima de cerca de 1,5 km no extremo norte, mas que sofre uma redução progressiva de largura para sul, reduzindo-se a uma praia larga no extremo sul do litoral do concelho, para sul da Fonte da Telha.

As áreas com declives mais acentuados do concelho foram afetadas por grande número de movimentos de massa de vertente (Figura 1) de diferentes tipos, principalmente escorregamentos translacionais superficiais e desabamentos nas escarpas, que têm impacto significativo nas atividades humanas e são uma limitação significativa ao uso do solo. Este aspecto é particularmente relevante porque existe uma ocupação antiga, consolidada, que inclui edifícios, instalações industriais e portuárias distribuídas ao longo da margem do rio Tejo, localizadas na sua maioria, no sopé de encostas íngremes, escarpas e arribas, com elevado potencial de instabilidade. Junto ao sopé e também cortando a antiga arriba da Costa da Caparica, há também edifícios e outras infra-estruturas em zonas de perigo de instabilidade de vertente, que são motivo de preocupação para as autoridades locais.

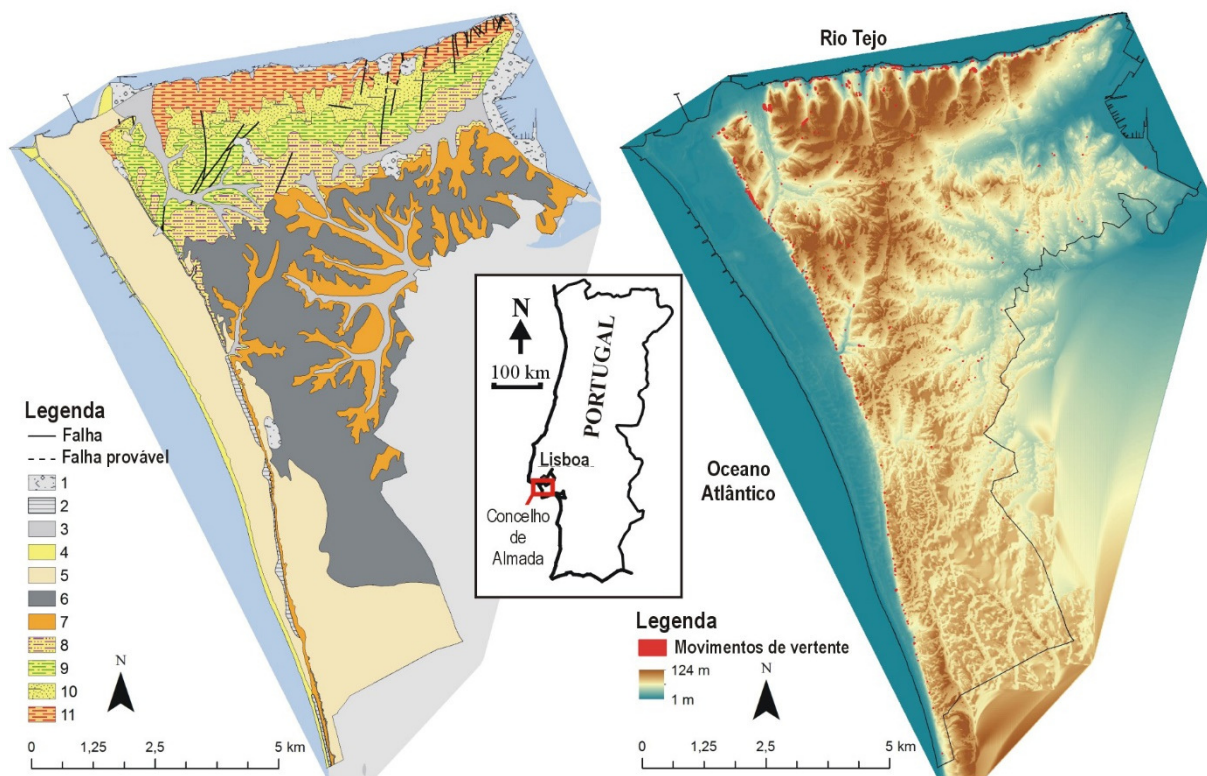


Figura 1 - Localização do concelho de Almada (mapa pequeno). À esquerda: mapa geológico simplificado de Almada: 1- Aterros; 2- Depósitos de vertente; 3- Aluviões; 4- Areias de praia; 5- Areias de dunas e dunas; 6- Cascalheiras, areias e argilas do Pleistocénico; 7- Areias siltsosas do Pliocénico; 8- Areias finas siltsosas do Tortoniano (Miocénico); 9 - Argilas, areias e calcários brandos do Serravalliano (Miocénico); 10- Calcários brandos e areias do Langhiano (Miocénico); 11- Areias finas siltsosas, argilas e calcários brandos do Burdigaliano (Miocénico) (CMA/DEGAS, 2005; CMA/DEGAS e FCT/CEG, 2005). Direita: inventário de movimentos de vertente (manchas encarnadas, com área ampliada para permitir visualização) sobre MDT com os limites do concelho (linha preta)

3 - DETERMINAÇÃO E CARTOGRAFIA DE SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE INSTABILIDADES DE VERTENTE

De acordo com as Orientações Estratégicas da REN (Decreto-Lei 239/2012), a cartografia de susceptibilidade à ocorrência de instabilidades de vertente deve ser elaborada recorrendo ao método estatístico bi-variado do valor informativo (VI, Yin e Yan, 1988), utilizando um inventário de instabilidades ocorridas no passado que foi correlacionado com um conjunto de factores de predisposição, utilizando como unidade cartográfica uma unidade matricial (píxel) de 5 m. O VI é um método bem conhecido e simples, mas suficientemente eficaz para elaborar cartografia de susceptibilidade à ocorrência de instabilidades em vertentes (por exemplo Zêzere, 2002, Guillard e Zêzere, 2012), como também em arribas litorais (Marques et al., 2011, 2013a).

O método do Valor Informativo determina um "score", ou pontuação, de susceptibilidade para cada variável, a partir da normalização logarítmica da razão entre a probabilidade condicionada e a probabilidade *a priori*, tal como está expresso na seguinte expressão:

$$I_i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad [1]$$

Na expressão, I_i representa o valor informativo da variável i , S_i representa o número de unidades de terreno com movimentos de vertente e com a presença da variável i , N_i o número de unidades de terreno com a presença da variável i , S representa o número de unidades de terreno com movimentos de vertente na área em estudo e N o número total de unidades de terreno na mesma área.

Segundo Yin & Yan (1988), quando o valor de I_i é negativo, considera-se que a variável em questão tem tendência a opor-se ao desenvolvimento de movimentos em vertente. Os resultados positivos indicam uma relação entre a presença da variável em causa e a predisposição para a ocorrência de instabilidades, sendo esta tanto mais acentuada quanto maior for o score de valor informativo. Para proceder à representação cartográfica do valor informativo calculado é necessário recorrer à seguinte expressão:

$$I_j = \sum_{i=1}^n X_{ji} \cdot I_i \quad [2]$$

Em que I_j representa o valor informativo da unidade de terreno, n representa o número de variáveis em estudo e X_{ji} assume os valores de 1 ou 0 dependendo se a variável está ou não presente na unidade de terreno em causa, respectivamente.

Este método estatístico permite uma avaliação objetiva da susceptibilidade, que é baseada apenas na distribuição espacial das classes dos factores de predisposição (variáveis) e na presença ou ausência de escorregamentos em cada unidade de terreno matricial (píxel). A principal limitação do método deve-se ao seu carácter bi-variado, isto é, não tem em consideração correlações que possam existir entre as variáveis.

3.1 - Inventário de movimentos de massa em vertente

O inventário de movimentos de massa em vertente compilado neste estudo foi adquirido usando diferentes métodos e fontes de informação, incluindo: a) comparação de restituições fotogramétricas digitais de fotografias aéreas de 1942 (voo SPLAL, CIGeoE, escala 1: 17,000) e 2010 (digital, Município, píxel de 0,3 m) para as encostas, escarpas e arribas da margem esquerda do rio Tejo; b) interpretação de fotografias aéreas de 2011 abrangendo toda a área de estudo, fornecidas pela Câmara Municipal de Almada; c) interpretação de imagens aéreas disponíveis na internet (*Google Earth*, *Bing Maps*); d) interpretação de fotografias terrestres tiradas da margem direita do Tejo e de embarcações, utilizando teleobjectivas apropriadas; e) trabalhos de campo para validação dos dados de fotogrametria e fotointerpretação, e identificação e caracterização de outros movimentos não detectados no trabalho de gabinete. Tendo em conta a impossibilidade prática de ter acesso a toda a área de estudo, dado que muitas das áreas mais propensas a fenómenos de instabilidade correspondem a propriedades privadas, fechadas ou a zonas de muito difícil acesso, foram identificados e cartografados 458 movimentos de massa em vertente que afetaram uma área total de $65,6 \times 10^3 \text{ m}^2$, ou seja, cerca de 0,1% da área total do concelho (Quadro 1, Figura 1).

Quadro 1- Resumo das características dos movimentos de vertente inventariados no concelho de Almada

<u>Tipos de movimentos</u>	Número	Número (%)	Área (m ²)	Área (%)
Desabamento ou tombamento	33	7,2	1.591	2,4
Escorregamento rotacional profundo (?) ^a	5	1,1	6.999	10,7
Escorregamento rotacional superficial (?) ^a	15	3,3	1.610	2,4
Escorregamento rotacional superficial	24	5,2	7.841	12,0
Escorregamento translacional superficial (?) ^a	85	18,6	21.600	32,9
Escorregamento translacional superficial	296	64,6	25.944	39,6
Total	458	100,0	65.585	100,0

^a Tipo de movimento identificado com dúvidas.

As dificuldades de acesso a muitos locais impossibilitaram a validação exaustiva dos movimentos identificados por fotointerpretação e limitaram também a capacidade de caracterizar com carácter sistemático os tipos de movimentos inventariados. Tendo em atenção as incertezas sobre a determinação da tipologia dos movimentos em vertente e também o facto de a grande maioria dos movimentos ocorrer em contextos geomorfológicos bem identificados, ou seja, as vertentes e escarpas da margem esquerda do Tejo e a escarpa da frente litoral atlântica, imprópriamente designada arriba fóssil da Costa da Caparica, optou-se por efectuar a determinação e cartografia de suscetibilidade utilizando a totalidade dos movimentos inventariados.

3.2 - Factores de predisposição dos movimentos em vertente

Os factores de predisposição utilizados para determinar e cartografar a susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertente por correlação com o inventário de movimentos, foram selecionados de acordo com as indicações das orientações estratégicas da REN e com a disponibilidade de informação em escala compatível com os objetivos do estudo. Os factores de predisposição utilizados foram:

a) Unidades geológicas. Foram consideradas as unidades geológicas constantes do mapa geológico de Almada, fornecido pela Câmara Municipal de Almada (CMA/DEGAS, 2005; CMA/DEGAS e FCT/CEG, 2005), com excepção das areias de praia e de dunas que foram agrupadas em uma única unidade, devido às suas semelhanças litológicas e também porque não foi identificado qualquer movimento em vertente nestas unidades. O mapa final utilizado inclui as seguintes unidades geológicas: aterros (at); aluviões (a); areias de praia e areias de duna (ap/ad); Conglomerado de Belverde (PICB) (Pleistocénico); Areias de Santa Marta (PASM) (Pliocénico); Areolas de Braço de Prata e de Cabo Ruivo (MVIIa+b); Argilas azuis de Xabregas (MVIa); Grés de Grilos e Calcários de Marvila (MVIb+c); Areias do Vale de Chelas e Calcários de Quinta das Conchas (MVB+c); Calcários de Musgueira (MVA3); Areias com "Placuna miocenica" (MVA2); Calcários de

Casal Vistoso (MVa1); Areias da Quinta do Bacalhau (MIVb); Argilas azuis do Forno do Tijolo (MIVa); Calcários de Entrecampos (MIII); Areolas da Estefânia (MII).

b) Unidades geomorfológicas. Foram consideradas as unidades geomorfológicas presentes no mapa fornecido pela CMA, com modificações, principalmente na cartografia das linhas de separação de bacias hidrográficas, designadas de "cabeços" sendo apenas mantidas as divisões das principais bacias. Neste mapa foram consideradas as seguintes unidades: Arriba fóssil e vertentes associadas; Arriba norte e vertentes associadas; Cabeço; Depósitos de vertente; Depósitos de vertentes (arriba fóssil); Praias e dunas; Vertente; Zona adjacente às linhas de água.

c) Mapa de uso do solo. Este mapa foi adaptado do mapa fornecido pela CMA e inclui as seguintes unidades: Áreas agrícolas; Dunas e praias; Vegetação arbórea; Vias comunicação; Zona urbana compacta; Zona urbana dispersa.

d) Nos restantes mapas, que foram obtidos por processamento da cartografia topográfica digital de 2011, com equidistância das curvas de nível de 1 m, na transformação de variáveis contínuas em categóricas procurou-se obter, sempre que possível, distribuição equilibrada de número de unidades de terreno (píxeis) pelas diferentes categorias (ou variáveis) de cada fator de predisposição.

No mapa de declives foram consideradas as seguintes classes de declive com limites em graus: 0-2,5; 2,5-5; 5-10; 10-15; 15-20; 20-25; 25-30; 30-90. As classes de declive mais baixo justificam-se pela grande extensão destas áreas no concelho de Almada, onde é expectável muito baixa suscetibilidade à ocorrência de movimentos em vertente. Nos declives mais elevados, superiores a 30°, a comparativamente reduzida área com declives superiores a este valor, as inevitáveis imprecisões dos mapas topográficos para os declives elevados e também o facto de os píxeis de 5 m utilizados no estudo provocarem uma suavização do declive, não foram considerados limites de declive superiores a 30°.

No mapa de exposição foram consideradas as seguintes classes, correntes em estudos deste tipo: Plano; N; NE; E; SE; S; SW; W; NW; N.

Nos mapas de curvatura do perfil e em planta das vertentes foram consideradas as seguintes classes: muito côncavo; moderadamente côncavo; pouco côncavo; retilíneo; pouco convexo; moderadamente convexo; muito convexo.

No "Topographic Wetness Index", calculado de acordo com a expressão $TWI = \ln(a/tg\beta)$, em que **a** é a área contributiva a montante e **β** é o declive (Beven e Kirkby, 1979), foram consideradas as seguintes classes de base essencialmente quantil: 0-3; 3-5; 5-7; 7-9; 9-11; 11-13; >13.

3.3 - Resultados da susceptibilidade à ocorrência de movimentos em vertente e discussão

A avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos em vertente realizada utilizando o método do VI, forneceu a indicação de que as variáveis com maior predisposição foram os declives superiores a 25° (25°-30° e >30°), as unidades geológicas do Miocénico (Burdigaliano), fundamentalmente compostas por argilas (MIVa, escorregamentos rotacionais e translacionais) e de calcários brandos (MVa1, desabamentos e tombamentos), as unidades geomorfológicas "Arriba Fóssil e vertentes associadas" e "Arriba norte e vertentes associadas", a curvatura em planta muito convexa e muito côncava e o TWI compreendido entre 0 e 3.

A eficiência do modelo de susceptibilidade, obtido através do somatório das pontuações relativas a cada variável presente em cada unidade de terreno (píxel), foi verificada por comparação com o inventário de instabilidades que lhe deu origem, através da curva de sucesso (Figura 2), onde foi projetada, no eixo das abcissas, a percentagem de unidades de terreno consideradas na área do concelho, ordenadas por ordem decrescente do VI, e, em ordenadas, a percentagem de unidades de terreno instabilizadas relativamente à área total instabilizada. Nesta curva verifica-se que ocorre uma rotura franca de declive ao nível de cerca de 83% a 84% da área total instabilizada, que corresponde a cerca de 5,2% da área do concelho de Almada.

Este tipo de curva, designada de *Receiver Operating Characteristic* (ROC), é uma ferramenta de base estatística aplicável à verificação da qualidade de qualquer modelo de previsão. Uma vez que o inventário foi utilizado tanto para produzir o modelo como para o validar, a curva produzida é denominada de curva de sucesso. Após a construção da respetiva curva ROC, foi calculada a Área Abaixo da Curva (AAC), que forneceu valor de 0,964, ficando na categoria dos modelos considerados excelentes. No entanto, deve notar-se que aquele valor de AAC é muito elevado no contexto deste tipo de estudos, mesmo considerando que é uma taxa de sucesso e não uma taxa de predição. Este resultado é parcialmente resultante da qualidade do modelo produzido, que se baseou num inventário de movimentos robusto, mas também, de existirem grandes áreas no município com declives muito baixos e, consequentemente, com muito baixa susceptibilidade à ocorrência de movimentos em vertente.

3.4 - Áreas de instabilidade de vertentes a incluir na REN

A observação da curva ROC obtida no presente estudo mostra uma rotura de declive a cerca de 83% da área total instável, o que corresponde a 5,2% da área do concelho. As Orientações Estratégicas da REN indicam que as áreas a incluir nos mapas da REN e, em consequência, objeto de severas restrições ao uso, devem incluir pelo menos 70% das áreas instáveis inventariadas. No entanto, na área de estudo, os bons resultados do modelo e a análise detalhada dos mapas resultantes indicaram que, considerando um limite de 80% do total de áreas instáveis, os resultados cartográficos eram muito mais coerentes e contínuos. A adopção deste último limite implica um aumento de 3,4% para 4,6% da área do concelho, ou seja, um aumento da área a incluir na REN de apenas 1,2% da área total, o que corresponde a $842 \times 10^3 \text{ m}^2$. Estas considerações levaram à proposta de incluir na REN as áreas que contêm 80% das zonas instáveis inventariadas.

É, no entanto, de notar que os resultados cartográficos obtidos em contexto Sistema de Informação Geográfica (SIG) sob a forma de ficheiros matriciais, têm limites denteados que são difíceis de gerir, não se ajustam correctamente aos limites das encostas e que deixam pequenas áreas isoladas classificadas como não susceptíveis cercadas por áreas susceptíveis à ocorrência de instabilidades. Para superar estes problemas, aplicou-se um procedimento de generalização, que incluiu: criação de um ficheiro de pontos com o somatório de pontuação do VI; geração de linhas de contorno com o valor limite de VI das áreas que abrangem 80% das zonas instáveis totais; suavização das curvas com um raio de curvatura de 15 m para evitar limites denteados; verificação manual de resultados e eliminação de polígonos isolados com menos de 400 m² ou com largura média inferior a 15 m, considerados valores conservadores para limites inferiores de área utilizável para construções. Além disso, de acordo com a lei, todas as áreas instáveis, cercadas por um *buffer* externo de 10 m, foram também incluídas no mapa das áreas a incluir na REN relativas a instabilidades de vertentes, mas sem a inclusão de escarpas, que foram objecto de tratamento separado (Figura 3).

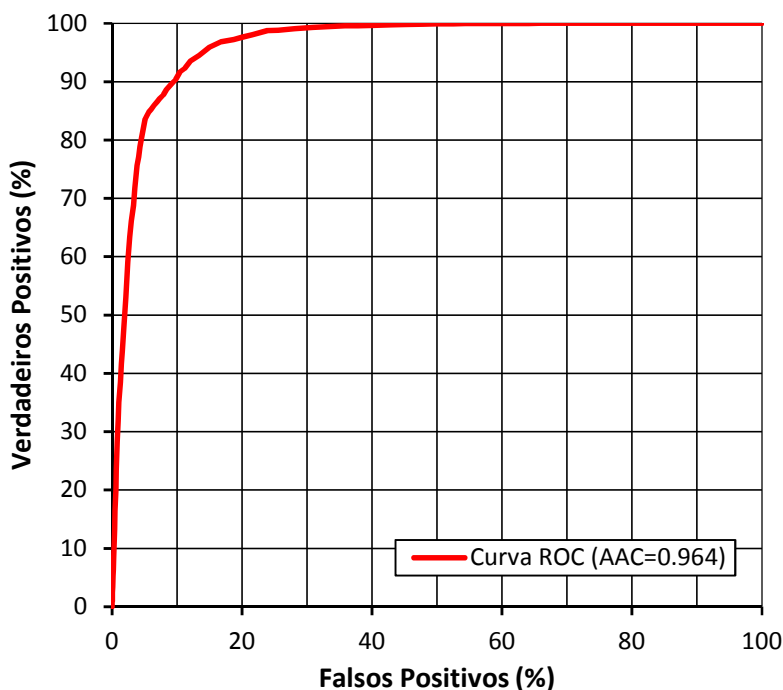


Figura 2 - Curva ROC de sucesso para avaliação dos resultados do modelo VI de susceptibilidade à ocorrência de instabilidades em vertente com o valor de área abaixo da curva (AAC)

4 - ESCARPAS E RESPECTIVAS FAIXAS DE PROTECÇÃO

A legislação em vigor indica que as encostas com declive superior a 45° devem ser incluídas na REN como escarpas, acrescentando-lhes faixas de protecção ao longo da crista e do sopé, com larguras mínimas iguais ao desnível entre a crista e a base. Considerando que o mapa topográfico disponibilizado para este estudo era muito detalhado, na escala 1: 1.000, as escarpas foram cartografadas usando um mapa de declives matricial com píxel de 2 m, em vez do mapa com píxel de 5 m sugerido na lei, para permitir a sua detecção e cartografia com maior rigor. Para a definição da faixa de protecção adjacente à crista das escarpas, e atendendo às incertezas existentes sobre os efeitos da ocupação localizada nas suas proximidades e obedecendo ao princípio da precaução, foi adoptado o critério legal, ou seja, uma largura da faixa igual ao desnível da escarpa adjacente.

Considerando as condições geológicas e geomorfológicas das escarpas de Almada, compostas fundamentalmente por rochas brandas e com o sopé frequentemente limitado por encostas íngremes, da indicação legal para a definição da faixa de protecção adjacente ao sopé com largura igual ao desnível da escarpa resultariam faixas pouco adequadas à extensão das áreas susceptíveis de serem afectadas pelo percurso de blocos caídos da escarpa.

Como método alternativo, foram seleccionados os principais desabamentos que ocorreram na área em estudo, com depósitos de detritos bem preservados e que ocorreram nas escarpas de maior desnível, tendo-se determinado o desnível da escarpa e a distância horizontal percorrida pelos detritos, medida a partir da crista da escarpa, para permitir a calibração de um ângulo de sombra ou ângulo de alcance adequado às condições da área em estudo. A análise das dimensões dos desabamentos seleccionados (Figura 4) indicou que um ângulo de sombra de 34° proporcionaria uma largura razoavelmente segura para a definição da faixa de protecção de sopé. O ângulo de sombra 34° foi então aplicado a todas as escarpas na área de estudo usando o programa *Conefall* (Jaboyedoff e Labiouse, 2011). A qualidade dos resultados foi verificada pela ocorrência de um desabamento em 6 de dezembro de 2014, que afetou duas faixas da estrada nacional IC20, perto da Costa da Caparica. Neste caso, a largura da faixa de protecção de sopé definida de forma independente efectuou previsão muito precisa do percurso dos blocos de rocha sobre o pavimento da estrada, sem sobrestimá-lo, o que constituiu boa indicação de sua eficácia na prevenção de riscos.

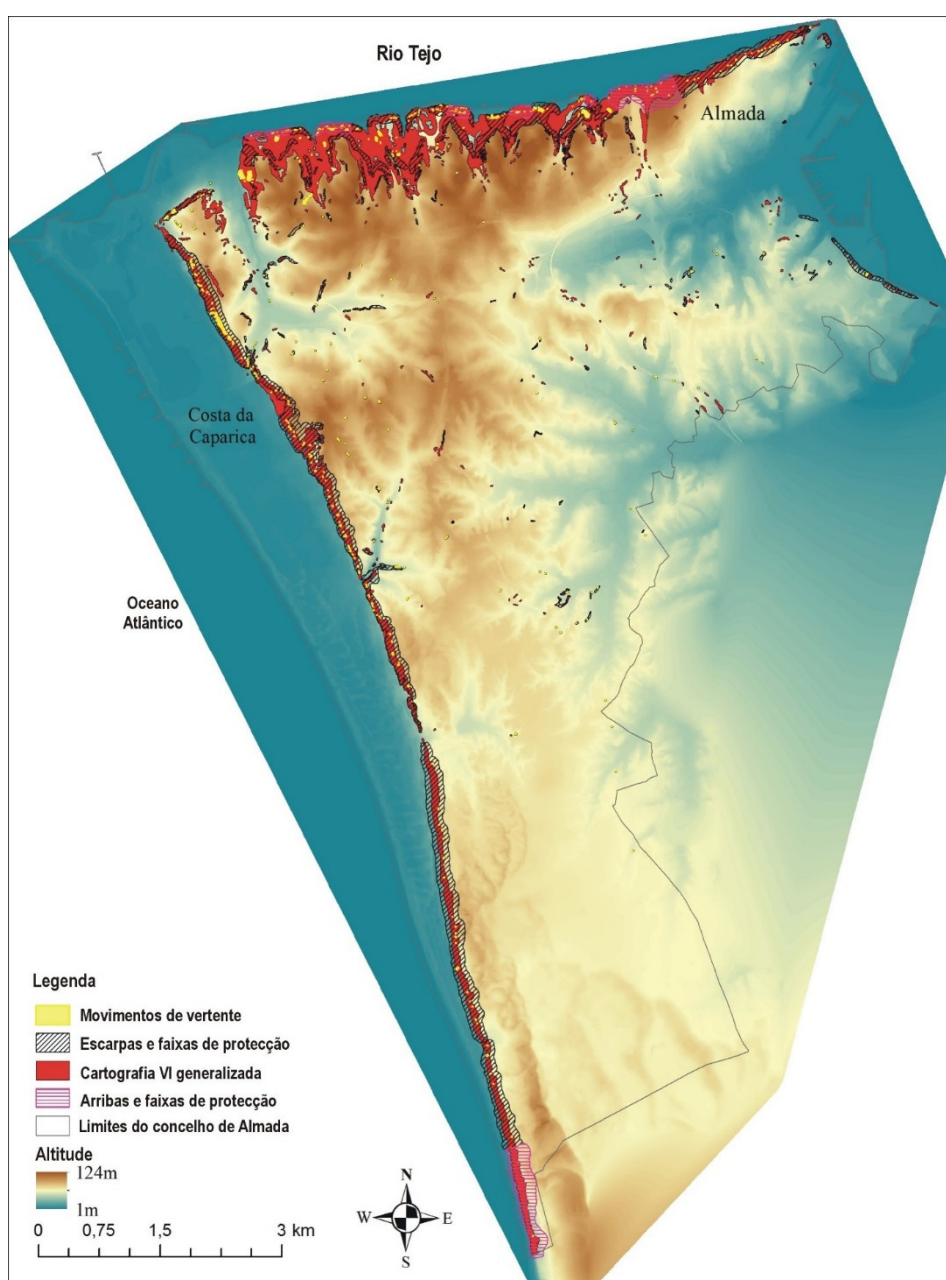


Figura 3 - Inventário de instabilidades em vertente (área exagerada para permitir visualização), escarpas e respectivas faixas de protecção, susceptibilidade à ocorrência de instabilidades em vertente determinada com o método do VI, com generalização, arribas e respectivas faixas de protecção sobre MDT do concelho de Almada

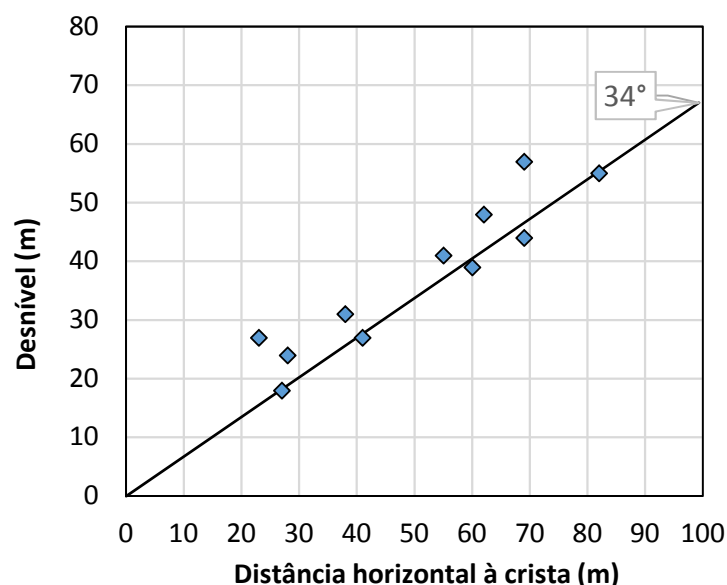


Figura 4 - Relação entre o percurso de detritos resultantes de desabamentos, medido na horizontal a partir da crista da escarpa e o desnível da escarpa, com a linha correspondente ao ângulo de sombra selecionado de 34°

5 - ARRIBAS E RESPECTIVAS FAIXAS DE PROTECÇÃO

As arribas activas no concelho de Almada ocorrem em dois contextos geomorfológicos distintos: um no extremo sudoeste do município, exposto às ações marinhas atlânticas e outro no limite norte do município, actuado pelas águas do estuário do rio Tejo.

No litoral SW do concelho, existem verdadeiras arribas litorais, actuadas episodicamente pelas águas do mar no sopé. Nestas adoptou-se a cartografia que tinha sido produzida no âmbito de um grande projeto de monitorização costeira desenvolvido para a Agência Portuguesa do Ambiente, IP (Marques et al., 2013b) e que foi incluída no novo Programa da Orla Costeira (POC) Alcobaça-Espichel em conclusão. É de notar que as soluções adoptadas nos POC se basearam na experiência anterior de definição de faixas de protecção de arribas para os planos costeiros de primeira geração (POOC) produzidos entre 1998 e 2002 (Marques, 2009). As arribas foram cartografadas utilizando mapas topográficos digitais na escala 1: 2.000, a partir dos quais foi derivado MDT com píxel de 2 m no terreno. Nas arribas actuadas contínua ou periodicamente no sopé pelo mar, foram definidas duas faixas de protecção para o interior da crista das arribas, com largura igual ao desnível da arriba adjacente e com um valor mínimo de 20 m, e uma faixa de protecção adjacente ao sopé também com largura igual ao desnível. A largura destas faixas de protecção foi baseada na análise de inventários sistemáticos de instabilidades em arribas ocorridas entre 1947 e 2010 (Marques et al., 2013b).

Nos sectores de antigas arribas, que não são actualmente actuadas pelo mar, mas estão em continuidade espacial com arribas ativas, foi considerada apenas uma faixa de protecção à crista, com largura igual à altura do desnível e com um valor mínimo de 20 m, e uma faixa de protecção adjacente ao sopé também igual à altura da arriba.

Nas arribas localizadas no limite norte do concelho, a situação em termos legais não é clara. Estas são escarpas em que o sopé é atuado permanentemente, periodicamente ou episodicamente pelas águas do rio Tejo, que são classificados na lei como águas de transição. Neste contexto, e considerando que a erosão no sopé é eficaz, mas não tem a intensidade da acção marinha directa, e também porque as arribas passam lateralmente a escarpas com morfologia e composição litológica similar, os critérios para a definição das faixas de protecção adjacentes à crista e ao sopé foram iguais aos aplicados para as escarpas. A faixa de protecção à crista foi cartografada com largura igual ao desnível da escarpa adjacente. De facto, os recuos do topo das arribas resultantes de movimentos de massa registados entre 1947 e 2010 foram sempre menos da metade da largura da faixa de protecção, pelo que o critério adoptado segue o espírito da lei e assegura a continuidade espacial das faixas de protecção ao longo das escarpas adjacentes, contribuindo para a coerência espacial dos resultados cartográficos produzidos.

Para a cartografia da faixa de protecção adjacente ao sopé foi também utilizado o ângulo de sombra de 34° definido para as escarpas adjacentes, o que garante simultaneamente a coerência espacial dos resultados cartográficos produzidos e a prevenção de riscos resultantes da ocorrência de desabamentos de arribas e escarpas.

6 - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os métodos utilizados neste estudo constituem avanço muito claro, em termos de fundamentação científica e técnica, relativamente aos critérios para cartografia da REN de acordo com as antigas versões da lei, de 1983 e 1990. Na verdade, os métodos utilizados neste estudo estão longe de ser os mais sofisticados ou atualizados na literatura científica. No entanto, obteve-se uma AAC da curva ROC muito alta para a taxa de sucesso dos resultados do modelo de susceptibilidade à ocorrência de instabilidades em vertente com o método do VI, o que se deve em parte à grande proporção de áreas de muito baixa susceptibilidade na área de estudo, mas também à qualidade do inventário de movimentos produzido e dos mapas de base utilizados usados. No decorrer dos trabalhos foi também utilizado um método estatístico multivariado e mais robusto, a regressão logística, aplicado ao mesmo inventário de movimentos e de factores de predisposição, mas os resultados obtidos foram apenas muito ligeiramente melhores em termos da AAC e de coerência de distribuição espacial, não se justificando a sua utilização, neste caso, em vez dos métodos indicados pela lei. Os resultados obtidos neste estudo sugerem também que a melhoria da avaliação e da cartografia de susceptibilidade à ocorrência de instabilidades em vertente depende mais da qualidade dos dados de base utilizados, nomeadamente do inventário de movimentos e da cartografia geológica (Henriques et al., 2015) do que da sofisticação dos modelos utilizados.

O tratamento do problema decorrente do percurso de blocos provenientes de desabamentos de escarpas pelo ângulo de sombra, calibrado por ocorrências na área de estudo, provou ser eficiente na previsão de um desabamento que afetou o IC20, em 2014, que poderia ter produzido perda de vidas e danos consideráveis, sem pecar pelo exagero da dimensão das faixas de salvaguarda de sopé de escarpas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio do projecto FCT UID/GEO/50019/2013 – IDL. Agradece-se a cooperação estreita de técnicos da Câmara Municipal de Almada, nomeadamente da Eng^a. Catarina Freitas, Dr. Nuno Lopes, Dr.^a Patrícia Silva e Dr.^a Sara Dionísio, pelo fornecimento dos dados de base, trabalhos de campo e debate das temáticas tratadas.

REFERÊNCIAS

- Beven, K. J. e Kirkby, M. J. (1979) - A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, vol. 24, pp. 43–69.
- CMA/DEGAS, (2005) - Carta Geológica do Concelho de Almada 1:20.000, com pormenorização da Zona Ribeirinha Norte na escala 1: 15.000. Acessível na Câmara Municipal de Almada. Departamento de Energia, Clima, Ambiente e Mobilidade. Almada, Portugal.
- CMA/DEGAS e FCT/CEG (2005) - Memória descritiva da Carta Geológica do Concelho de Almada. Relatório Técnico. Departamento de Estratégia e Gestão Ambiental Sustentável da Câmara Municipal de Almada e Centro de Estudos Geológicos da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Almada, Portugal.
- Decreto-Lei 321/83, de 5 de Julho de 1983. Criou a Reserva Ecológica Nacional. (<http://dre.pt/pdf1sdip/1983/07/15200/24252427.pdf>).
- Decreto-Lei 93/90, de 19 de Março de 1990. Revisão do regime legal da Reserva Ecológica Nacional. (<http://dre.pt/pdf1sdip/1990/03/06500/13501354.pdf>).
- Decreto-Lei 166/2008, de 22 de Agosto de 2008. Aprova o regime legal da Reserva Ecológica Nacional e revoga o Decreto-Lei 93/90. (<http://dre.pt/pdf1sdip/2008/08/16200/0586505884.pdf>).
- Decreto-Lei 239/2012, de 2 de Novembro. Primeira alteração ao Decreto-Lei 166/2008, que estabelece as Orientações Estratégicas da Reserva Ecológica Nacional. (<http://dre.pt/pdf1sdip/2012/11/21200/0630806346.pdf>).
- Guillard, C., e Zêzere, J. (2012) - Landslide susceptibility assessment and validation in the framework of municipal planning in Portugal: the case of Loures Municipality. *Environmental Management*, vol. 50(4), pp. 721–735.
- Henriques, C., Zêzere, J.L., e Marques, F. (2015) - The role of the lithological setting on the landslides pattern and distribution. *Engineering Geology*, vol. 189, pp. 17–31.
- Jaboyedoff, M. e Labiouse, V. (2011) - Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. vol. 11, pp. 819–828.
- Julião, R.P., Nery, F., Ribeiro, J.L., Branco, M.C. e Zêzere, J.L. (2009) - Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal. Autoridade

- Marques, F.M.S.F. (2009) - Sea cliff instability hazard prevention and planning: examples of practice in Portugal. *Journal of Coastal Research*, SI, vol. 56, pp. 856-860.
- Marques, F. M. S. F., Matildes, R., e Redweik, P. (2011) - Statistically based sea cliff instability hazard assessment of Burgau-Lagos coastal section (Algarve, Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI, vol. 64, pp. 927-931.
- Marques, F. M. S. F., Matildes, R., e Redweik, P. (2013a) - Sea cliff instability susceptibility at regional scale: a statistically based assessment in the southern Algarve, Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, pp. 3185-3203.
- Marques, F., Penacho, N., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., e Redweik, P. (2013b). Entregável 1.3.3.a Estudo da adequabilidade das faixas de risco/salvaguarda definidas no POOC em vigor. Relatório Técnico, Projeto Criação e implementação de um sistema de monitorização no litoral abrangido pela área de jurisdição da Administração da Região Hidrográfica do Tejo. FFCUL/APA, I.P., Lisboa, junho 2013., 66 pp + anexos. (<http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=7&sub2ref=10&sub3ref=1192>).
- Yin, K. L. e Yan, T. Z. (1988) - Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In: *Landslides, Proc. 5th Int. Symp. Landslides*, Bonnard, C. (ed.), Lausanne, Switzerland, Balkema, Rotterdam, vol. 2, pp. 1269-1272.
- 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, pp. 73-82.