

## **Deliverable E 2.1.1: Relatório técnico sobre inventários**

### **Activity 2.1: Cartografia de suscetibilidade / perigosidade**

**Due date of deliverable:** 30/09/2020

**Actual submission date:** 30/09/2020

**Lead contractor for this deliverable:** IGOT-ULISBOA

### **Autores**

José Luís Zêzere, Ricardo Garcia, Sérgio Oliveira, Susana Pereira, Pedro Pinto Santos, Raquel Melo, Eusébio Reis



## **ÍNDICE**

1.	INTRODUÇÃO.....	3
2.	TIPOS DE MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	5
2.1.	DESABAMENTO (fall).....	5
2.2.	BALANÇAMENTO (topple).....	6
2.3.	DESLIZAMENTO (slide).....	7
2.4.	ESCOADA (flow).....	8
3.	INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE NA BACIA DO RIO GRANDE DA PIPA.....	9
3.1.	INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	9
3.2.	MÉTODOS UTILIZADOS NA INVENTARIAÇÃO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	10
3.2.1.	LEVANTAMENTOS DE CAMPO.....	10
3.2.2.	FOTOINTERPRETAÇÃO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS E ORTOFOTOMAPAS.....	13
3.2.3.	OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	18
2.	RESULTADOS.....	20
3.	CONCLUSÕES.....	25
4.	BIBLIOGRAFIA.....	25

## 1. INTRODUÇÃO

O GT2 tem por base o desenvolvimento de ferramentas cartográficas de prevenção de riscos para aplicação no ordenamento do território e planeamento de emergência. As principais ferramentas a desenvolver incluem a criação e atualização de cartografia de perigosidade, vulnerabilidade e risco associados às regiões costeiras SUDOE, adaptadas a diferentes cenários de risco futuros previstos pelas alterações climáticas.

A Atividade 2.1 - Cartografia de suscetibilidade / perigosidade, do GT 2 do projeto RISKCOAST, tem como objetivo produzir cartografia de suscetibilidade para os perigos relevantes em cada região costeira do SUDOE identificados com base nos inquéritos e inventários obtidos no GT1, com recurso a métodos de base estatística e/ou determinística.

O principal objetivo do presente relatório técnico (E.2.1.1) é definir o conjunto de procedimentos necessários à inventariação e análise de ocorrências de movimentos de vertente na área de estudo SUDOE da bacia do Rio Grande da Pipa (RGP) (Fig. 1), um dos principais perigos geomorfológicos que afetam a área de estudo (Garcia e Oliveira, 2020).

A coordenação do GT2 é assegurada pela equipa IGOT-ULISBOA que estabelece os procedimentos metodológicos de produção de ferramentas cartográficas de prevenção de riscos. A aplicação destas metodologias às diferentes áreas de estudo é desenvolvida posteriormente por cada um dos beneficiários participantes no GT2. A equipa IGOT-ULISBOA assegura a cada um dos beneficiários o apoio técnico necessário à aplicação das metodologias propostas.

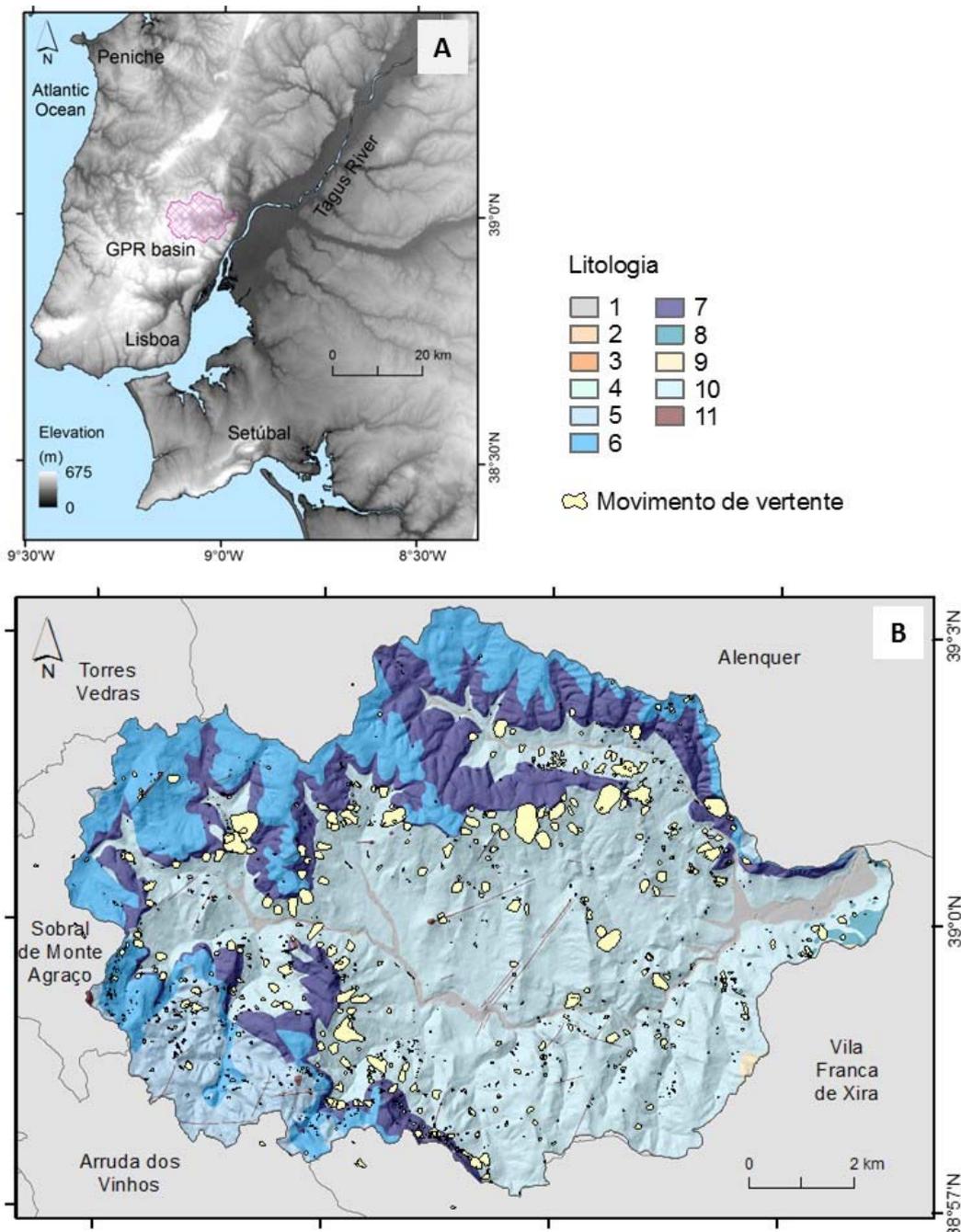


Figura 1 – Enquadramento geográfico da bacia do Rio Grande da Pipa (RGP) (A). Distribuição das diferentes unidades litológicas na área de estudo. (B): 1 - Aluviões; 2 – Calcários com intercalações; 3 – Conglomerados, arenitos e argilas; 4 – Arenitos, margas e calcários; 5 – Calcários e margas; 6 – Argilas, arenitos, margas e calcários; 7 – Calcários corálicos; 8 - calcários; 9 – Arcoses; 10 – Margas, argilas e arenitos; 11 – Filões e massas.

## 2. TIPOS DE MOVIMENTOS DE VERTENTE

A classificação de movimentos de vertente adotada tem por base a proposta de Cruden e Varnes (1996).

Os movimentos de vertente (*landslides*) correspondem do ponto de vista da sua abrangência ao termo mais restrito dos movimentos de massa. Esta assunção exclui da análise para a área de estudo da bacia do RGP os movimentos de terreno que impliquem subsidência (abatimentos, assentamentos), os fenómenos que impliquem e expansão-retração em solos argilosos e os movimentos associados ao gelo e à neve.

Assim, para efeitos de inventário de ocorrências é considerada a classificação de movimentos de vertente proposta por Cruden e Varnes, (1996): desabamento (*fall*), balançamento (*topple*), deslizamento (*slide*), expansão lateral (*lateral spread*) e escoada (*flow*).

A classificação destes movimentos de vertente tem ainda em consideração: i) a profundidade da superfície de rutura, sendo definidos como superficiais os movimentos de vertente com profundidade da superfície de rutura <3 m e profundos aqueles com profundidade da superfície de rutura >3 m; e ii) o tipo de material afetado (rocha, detritos ou solo).

A classificação do tipo de material onde ocorre o movimento de vertente foi adaptada de Varnes (1978), que define três classes de materiais: (i) rocha - rocha dura ou firme, intacta e *in situ*, antes da ocorrência do movimento; (ii) detritos - solo na perspetiva da engenharia, geralmente superficial, com percentagem significativa de material grosseiro (20-80% dos fragmentos maiores que 2 mm); (iii) solo – solo na perspetiva da engenharia, que inclui uma vasta tipologia de materiais, desde mais arenosos a argilas de grande plasticidade, em que a percentagem de material com menos que 2 mm aproxima-se dos 80%.

### 2.1. DESABAMENTO (*fall*)

Um desabamento (Fig. 2) corresponde a uma “deslocação de solo ou rocha a partir de um abrupto, ao longo de uma superfície onde os movimentos tangenciais são nulos ou reduzidos. O material desloca-se predominantemente pelo ar, por queda, saltação ou rolamento” (WP/WLI,

1993b: 6-2). Tendem a ser movimentos extremamente rápidos, desde a ruptura inicial até ao momento de imobilização da massa deslocada (Flageollet e Weber, 1996), e podem progredir em queda livre se as vertentes abaixo das massas de solo ou rocha que se vão destacar excederem  $70^\circ$ . Entre este limiar e os  $45^\circ$  tende a ocorrer saltação e em declives inferiores a  $45^\circ$  as partículas de solo ou rocha adquirem trajectórias dominadas por rolamento (Cruden e Varnes, 1996).



*Figura 2 – Desabamentos superficiais a afectar a cornija talhada na formação dos calcários de Amaral, sub-bacia do rio Salema, no lugar da pedreira da MOTA-ENGIL (Casal do Tojal). (A) desabamento de bloco por colapso (column collapse, de acordo com Hantz et al., 2003), sem desmonte na queda; (B) desabamento com aprisionamento de blocos pela vegetação na base da cornija. Fonte: Oliveira (2012).*

## 2.2. BALANÇAMENTO (topple)

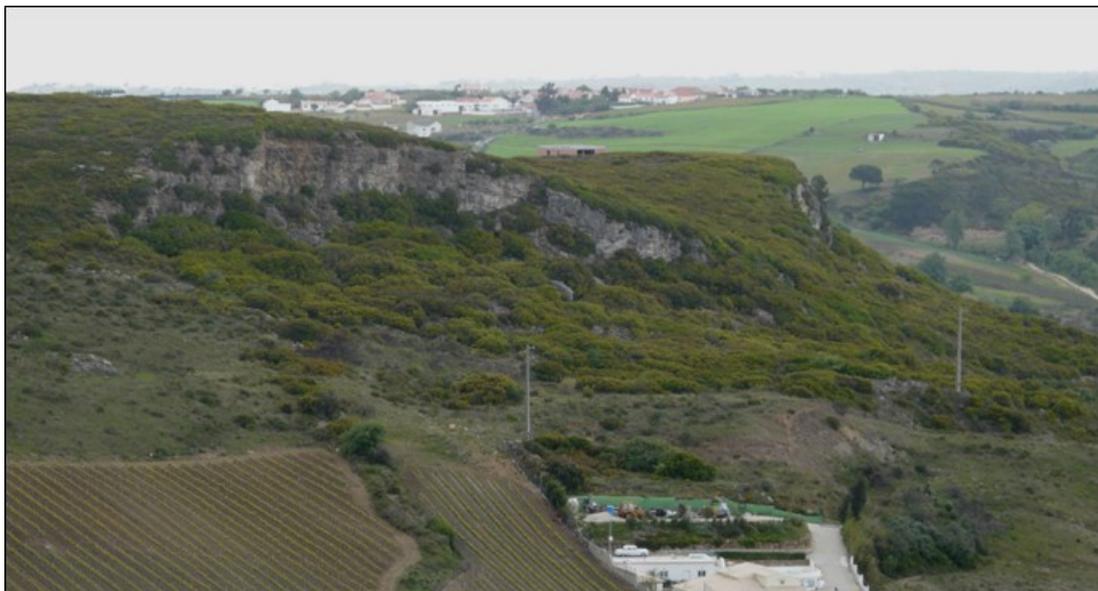
O balançamento caracteriza-se por uma “rotação de uma massa de solo ou rocha, a partir de um ponto ou eixo situado abaixo do centro de gravidade da massa afectada” (WP/WLI, 1993b: 6-2). Neste tipo de movimento de vertente, a descompressão por efeitos de erosão na vertente e o desenvolvimento de um conjunto de fendas de tracção são frequentemente pré-requisitos essenciais (Dikau et al., 1996b). Os balançamentos podem evoluir para desabamentos ou deslizamentos, dependendo da geometria da massa instabilizada, da geometria da superfície de destacamento (separação) e da orientação e extensão das discontinuidades cinematicamente activas (Cruden e Varnes, 1996). Relativamente à sua velocidade, esta pode ser bastante variada e difícil de determinar.

### 2.3. DESLIZAMENTO (slide)

Um deslizamento corresponde a um “movimento de solo ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de planos de ruptura ou de zonas relativamente estreitas, alvo de intensa deformação tangencial” (WL/WLI, 1993b: 6-2). O volume de material deslocado tende a aumentar com o afastamento à área de rutura inicial e pode deslizar para além do limite jusante do plano de rutura cobrindo a superfície topográfica original, que passa localmente a superfície de separação (Cruden e Varnes, 1996).

#### a) Deslizamento rotacional

Os deslizamentos rotacionais (Fig. 3) ocorrem ao longo de superfícies de rutura curvas e côncavas e principalmente em materiais homogêneos (apesar da raridade no ambiente litológico dos meios perfeitamente isotrópicos) (Cruden e Varnes, 1996). Neste tipo de deslizamentos podem ocorrer descidas verticais abruptas de material, imediatamente a jusante da cicatriz principal (cabeça do deslizamento) com a parte superior da massa deslocada a inclinar para montante (Cruden e Varnes, 1996), formando aclives.



*Figura 3 – Deslizamento rotacional profundo, no lugar da Zibreira de Fetais, Casal do Nogueira (sub-bacia da Zibreira) a afectar as formações dos calcários de Amaral e das margas de Abadia. Fonte: Oliveira (2012)*

#### b) Deslizamentos translacionais (superfície de rutura planar)

Os deslizamentos translacionais (Fig. 4) estão associados a uma superfície de rutura planar ou muito pouco ondulada. Esta caracteriza-se por um baixo ângulo de cisalhamento, geralmente paralelo à superfície topográfica original, e a sua forma em plano tende a aproximar-se de um rectângulo ou de um triângulo (Ibsen et al., 1996b). O seu deslocamento vai geralmente para além da superfície de rutura, cobrindo a jusante a superfície topográfica original (Cruden e Varnes, 1996). Os deslizamentos translacionais resultam, frequentemente, do contacto entre o maciço rochoso e níveis de solo residual ou transportado (Cruden e Varnes, 1996).

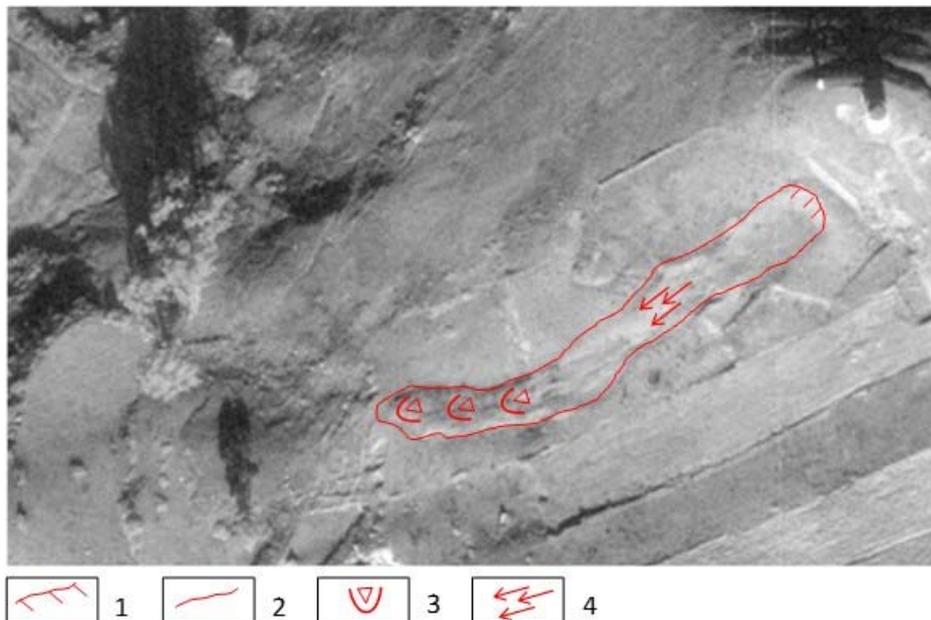


*Figura 4 – Deslizamento translacional superficial (A-dos-Arcos – Louriceira de Baixo).  
Fonte: Oliveira (2012)*

#### 2.4. ESCOADA (flow)

Uma escoada (Fig. 5) corresponde a um “movimento espacialmente contínuo onde as superfícies de tensão tangencial são efémeras e frequentemente não preservadas. A distribuição das velocidades na massa deslocada assemelha-se à de um fluido viscoso” (WP/WLI, 1993b: 6-2). Nas escoadas as tensões distribuem-se por toda a massa afectada, conduzindo, geralmente, a uma grande deformação interna dos materiais e à existência de velocidades diferenciadas, quase sempre maiores junto à superfície (Carson e Kirkby, 1975; Bromhead, 1992 *in* Zêzere, 1997). A transição de um deslizamento para escoada está dependente em muitos

casos do teor de água no solo (perda de coesão), da mobilidade (vertentes muito inclinadas) e da evolução do movimento (Cruden e Varnes, 1996). As escoadas podem ocorrer em vertentes abertas ou surgir canalizadas, podem estender-se por vários quilómetros antes de depositarem a carga sólida, e podem funcionar em impulsos resultantes da periódica mobilização de material ou pela formação e posterior ruptura de barragens formadas pelos detritos (Cruden e Varnes, 1996).



*Figura 5 – Escoada lamacenta, vista de fotografia aérea de 8 de Dezembro de 1983 (Moinho do Céu). (1) Cicatriz principal; (2) Limite do material deslizado; (3) Orla e língua de acumulação; (4) Sector preferencial de transporte. Fonte: Oliveira (2012).*

### **3. INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE NA BACIA DO RIO GRANDE DA PIPA**

#### **3.1. INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE**

A elaboração de um inventário de movimentos de vertente para a bacia do RGP teve como objetivo principal a definição de um inventário de base geomorfológica multi-temporal. Para o efeito, recorreu-se a levantamentos sistemáticos e ao reconhecimento de campo, apoiado por cartografia geomorfológica das instabilidades sobre fotografias aéreas e ortofotomapas à escala 1:2.000. Recorreu-se ainda a referências bibliográficas, à

interpretação geomorfológica de um modelo numérico de elevação (MNE), de modelos de relevo sobreado, e da altimetria na escala 1:10.000.

## **3.2. MÉTODOS UTILIZADOS NA INVENTARIAÇÃO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE**

### **3.2.1. LEVANTAMENTOS DE CAMPO**

O trabalho de campo incluiu o levantamento geomorfológico sistemático de movimentos de vertente para a totalidade da área da bacia do RGP, apoiado por cartografia sobre ortofotomapas à escala 1:10.000, com resolução de 0,5 m reproduzidos na escala de referência de 1:2000. Para o efeito, a área de estudo foi dividida em sub-bacias e estas foram seccionadas em rectângulos de aproximadamente 0,44 km<sup>2</sup> (501 mapas de 800 m x 550 m) (Fig. 6).

Um procedimento comum na utilização de ortofotomapas é a consideração de uma imagem de base (Walstra et al., 2007). Desta forma, garante-se que a informação adicionada aos ortofotomapas está corrigida geometricamente, facilitando as comparações entre mapas/ortofotomapas de diferentes épocas. No caso dos ortofotomapas, a cartografia pode apresentar um ligeiro exagero nos erros verticais e ver minimizados os erros planimétricos. Para o efeito determinou-se que a imagem de base corresponde ao ortofotograma produzido pelo Instituto Geográfico Português (IGP, atual Direção-Geral do Território), datado de 2004.

O trabalho de campo foi realizado entre março de 2006 e o final de 2009, ainda que de forma descontinuada. Adicionalmente realizaram-se várias saídas de campo de reconhecimento e inventariação, até à atualidade, na sequência de episódios chuvosos, que ultrapassaram os limiares críticos regionais (intensidade/duração) definidos para a estação udométrica de São Julião do Tojal (e.g., Zêzere et al., 2008).

Factores como a variação da hora a que foi feito o levantamento, diferenças no estado fenológico das plantas, humidade no solo ou altura do ano, revelaram-se fundamentais para a identificação e cartografia de alguns movimentos.

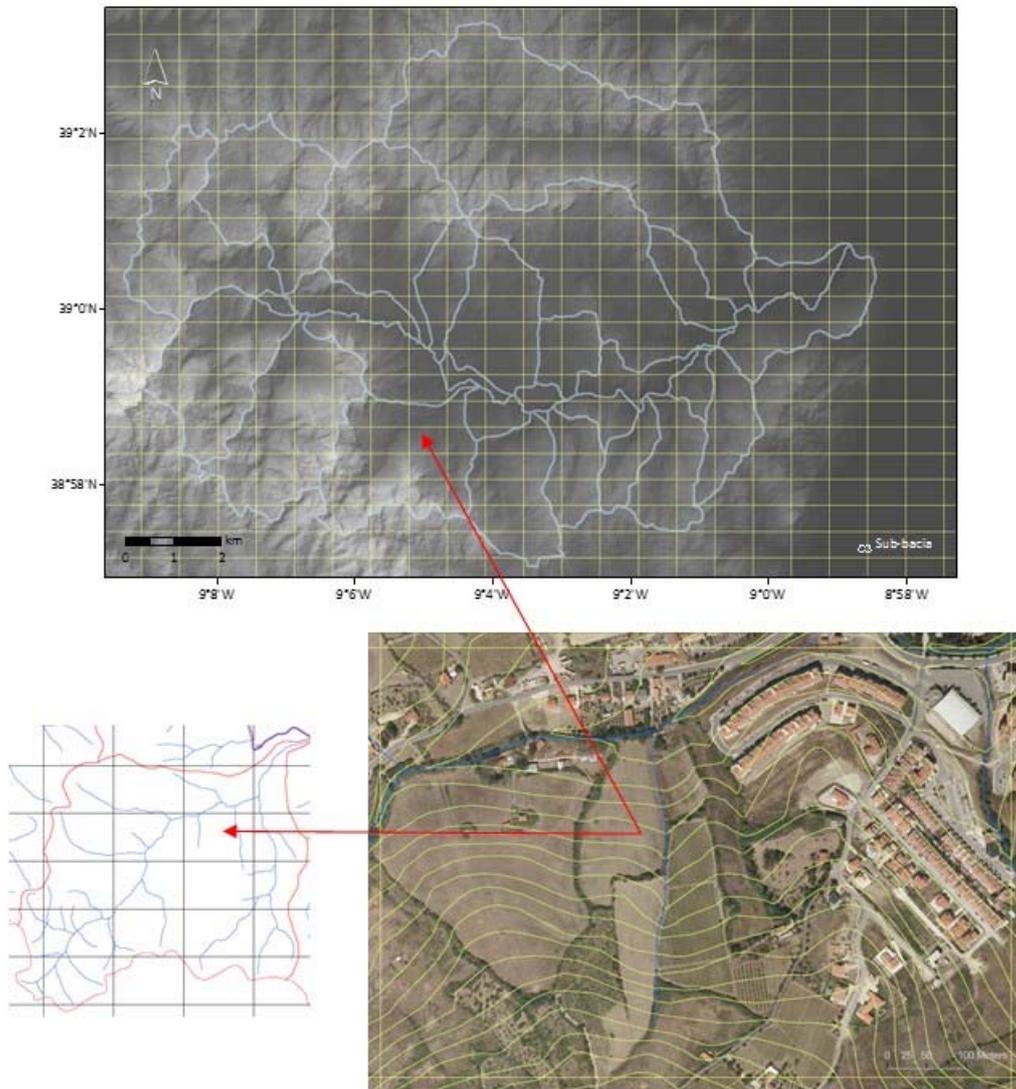


Figura 6 – Seccionamento da bacia do RGP em folhas de campo à escala de 1:2.000 e excerto de mapa de campo (ampliação do ortofotomapa e da altimetria à escala 1:10.000). Fonte: Oliveira (2012).

Na área de estudo existem mais de 400 registos de danos em estradas e edifícios relacionados com a ocorrência de movimentos de vertente superficiais e profundos. Estes danos estruturais/não estruturais nos elementos construídos (e.g., casas, estradas), bem como outros registos de deformação em elementos naturais (Fig. 7), tiveram um papel fundamental na identificação e delimitação dos movimentos de vertente na área de estudo. A razão prende-se com a existência de um regime de precipitação caracterizado por uma grande irregularidade interanual, podendo suceder mais de uma dezena de anos entre eventos de instabilidade desencadeados pela precipitação com relevância regional. Dessa forma, a inventariação de

movimentos de vertente é dificultada pela ausência de cicatrizes “frescas”, fendas de tracção nas áreas deformadas, flancos ou limites de movimentos de vertente bem conservados.



Figura 8 – Danos estruturais ou tipos de deformação utilizados para definir e delimitar os diferentes tipos de movimentos de vertente na bacia do RGP. (A) Fraturação oblíqua em casas; (B) Fraturas com deslocamento horizontal; (C) Inclinação da habitação; (D) Fraturação vertical em casas; (E) Desligamento em muros limitadores de propriedade; (F) Fraturação vertical de muros; (G) Fraturação vertical de muros com translação; (H) Deformação acentuada de muros e pavimentos; (I) Inclinação de árvores; (J) Fraturas e deformação de poços; (K) Fraturação parabólica na estrada; (L) Fratura na estrada com desligamento; (M) Fraturação perpendicular ao sentido da via; (N) Fraturação paralela à via; (O) Fraturação cruzada em pavimento. Adaptado de Oliveira et al. (2015).

A identificação da data de ocorrência constituiu um dos grandes problemas encontrados na inventariação dos movimentos de vertente identificados através de trabalho de campo. Na Fig. 8 é representado um excerto de um mapa de campo com o levantamento geomorfológico efetuado e a respetiva fotografia de campo. A cada movimento de vertente foi atribuído um código (ID), foi preenchido um relatório simplificado de campo e efetuou-se a respetiva documentação fotográfica.



*Figura 8 – Excerto de mapa de campo e respetiva vista panorâmica da área instabilizada. Sub-bacia da Zibreira- bacia do Rio Grande da Pipa. Fonte: Oliveira (2012).*

### **3.2.2. FOTOINTERPRETAÇÃO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS E ORTOFOTOMAPAS**

As fotografias aéreas correspondem à principal fonte de informação utilizada para cartografar a localização, tipo e causa dos movimentos de vertente (Brabb, 1991). As técnicas envolvidas na extracção da informação relevante a partir das fotografias aéreas baseiam-se em dois princípios fundamentais: análise qualitativa apoiada em fotointerpretação (API – Aerial Photo-interpretation), sem que as fotografias tenham sido corrigidas geometricamente; fotointerpretação e análise quantitativa suportada pela aplicação de técnicas fotogramétricas (e.g. Wolf, 1983; Zanutta et al., 2006; Walstra et al., 2007a).

A metodologia utilizada na área de estudo baseou-se essencialmente na interpretação monoscópica de ortofotomapas e de fotografias aéreas, recorrendo-se sempre que necessário à validação estereoscópica dos movimentos de vertente, quando utilizadas fotografias aéreas. As formas naturais tendem a seguir uma configuração distinta das formas culturais (humanas), que são frequentemente geométricas, de linhas rectas, ângulos agudos e formas regulares (Aber et al., 2010) e por isso diferenciáveis. No caso da interpretação monoscópica, a presença de sombras auxilia na fotointerpretação pela percepção da profundidade. Imagens sem sombras são frequentemente mais difíceis de interpretar, pese embora o excesso de sombra possa obscurecer e diminuir o contraste dos elementos de interesse (Aber et al., 2010).

Para a elaboração dos inventários de movimentos de vertente para a bacia do RGP, foi utilizado um conjunto de documentos em formato digital, enumerados e descritos na Tabela 1.

*Tabela 1 – Documentos digitais (ortofotomapas e coberturas de fotografias aéreas) utilizados para fotointerpretação de movimentos de vertente na bacia do RGP.*

<b>DESIGNAÇÃO</b>	<b>Data</b>	<b>Tipo de Documento</b>	<b>Entidade</b>	<b>Escala</b>	<b>DF</b>	<b>Forma to</b>
Voo 1983 (Vale do Tejo)	08-13 Dez1983	Fotografia Aérea pancromática	FAP	1:15.00 0	UAg 1023 151,99	Digital
Voo 1989 (Península de Lisboa)	02 Mai1989	Fotografia Aérea pancromática	FAP	1:15.00 0	UAg 1071 152,31	Digital
Voo 1989 (Península de Lisboa)	15 Mai1989	Fotografia Aérea pancromática	FAP	1:15.00 0	UAg 1203 151,99	Digital
Orto 2004	2003	Ortofotomapa COR	CMAV	1:10.00 0	-----	Digital
Orto 2005	2004	Ortofotomapa COR	IGP	1:10.00 0	-----	Digital
Orto 2007	2007	Ortofotomapa COR	IGP	1:10.00 0	-----	Digital
Orto 2012	2012	Ortofotomapa COR	IGP	1:10.00 0	-----	Digital

## - Georreferenciação das fotografias aéreas

Na impossibilidade de utilização de técnicas fotogramétricas para processar a informação observável nas fotografias aéreas, procurou-se adoptar um procedimento que garantisse, por um lado, a correcta identificação dos movimentos e, por outro, que a passagem da informação para o formato digital se fizesse acompanhar dos menores erros possíveis (georreferenciação e correcção parcial da deformação associada à projecção central das fotografias). A experiência adquirida com o trabalho de campo permitiu a identificação de grande parte dos movimentos sem recorrer à estereoscopia, sobretudo no voo de 1983.

O processo de georreferenciação foi efectuado com recurso ao ArcGIS v9.3.1<sup>®</sup> e consistiu em três etapas distintas: posicionamento, triangulação e correcção geométrica. Na primeira etapa de posicionamento foi identificado previamente um conjunto de pontos de controlo na imagem de referência (neste caso o ortofotomapa do IGP de 2004) com correspondência na fotografia aérea a georeferenciar (Fig. 9). Nesta fase inicial um número mínimo de 10 pontos espacialmente distribuídos foi suficiente para orientar a fotografia e fixá-la às coordenadas do ortofotomapa.



*Figura 10 – Pontos de controlo (sinal + a vermelho) na fotografia aérea e respectiva correspondência na imagem de referência, o ortofotomapa de 2005 do IGP. Fonte: Oliveira (2012).*

Na segunda etapa de triangulação, a malha de pontos de controlo é ampliada em função do número de movimentos identificados e da rugosidade topográfica (declive, comando e forma da vertente). O *software* SIG possibilita o ajuste dos dados a uma função polinomial, de 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> ou 3<sup>a</sup>

ordem, mas o melhor ajuste foi conseguido através de uma transformação *Spline*. Este tipo de transformações baseia-se num método de interpolação que estima valores através de uma função matemática que minimiza a curva de superfície global, resultando numa superfície suavizada que passa exactamente pelos pontos considerados.

Na Fig. 10, encontra-se a localização dos 92 pontos de controlo utilizados na georeferenciação de uma das fotografias aéreas do voo de 1983 (Fig. 11). Para cada movimento foram considerados no mínimo quatro pontos, referentes aos limites de propriedade onde ocorre a instabilidade, podendo esse número aumentar para movimentos maiores e para áreas muito declivosas ou de relevo acidentado.

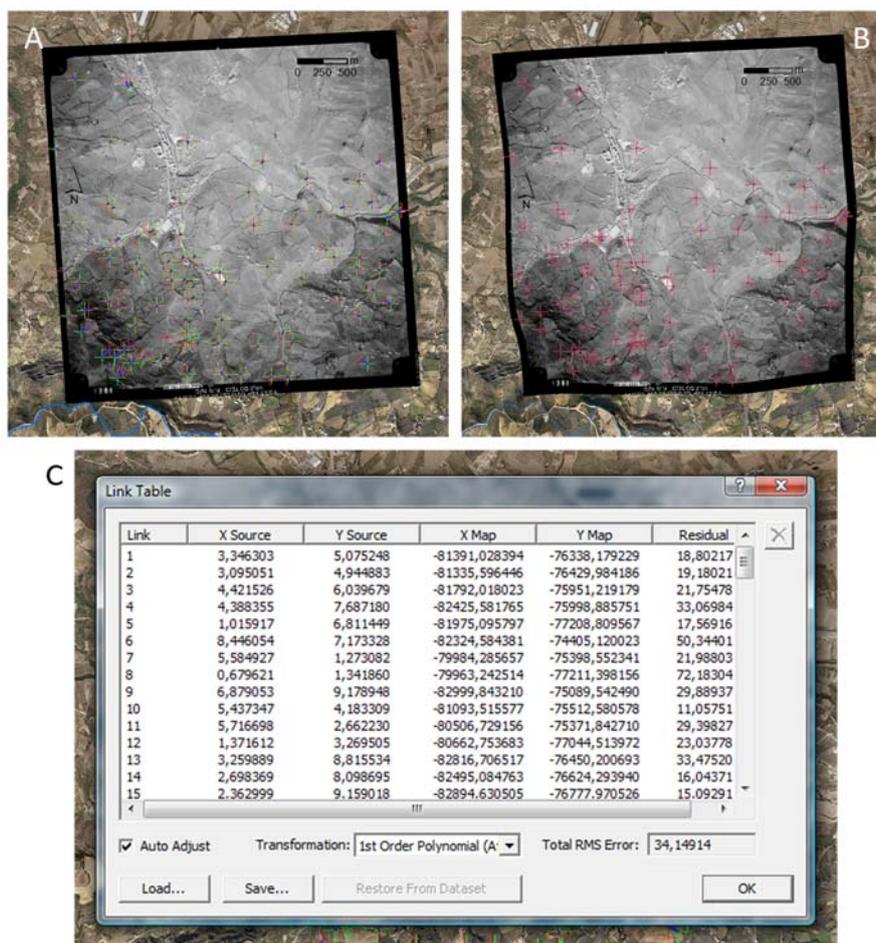
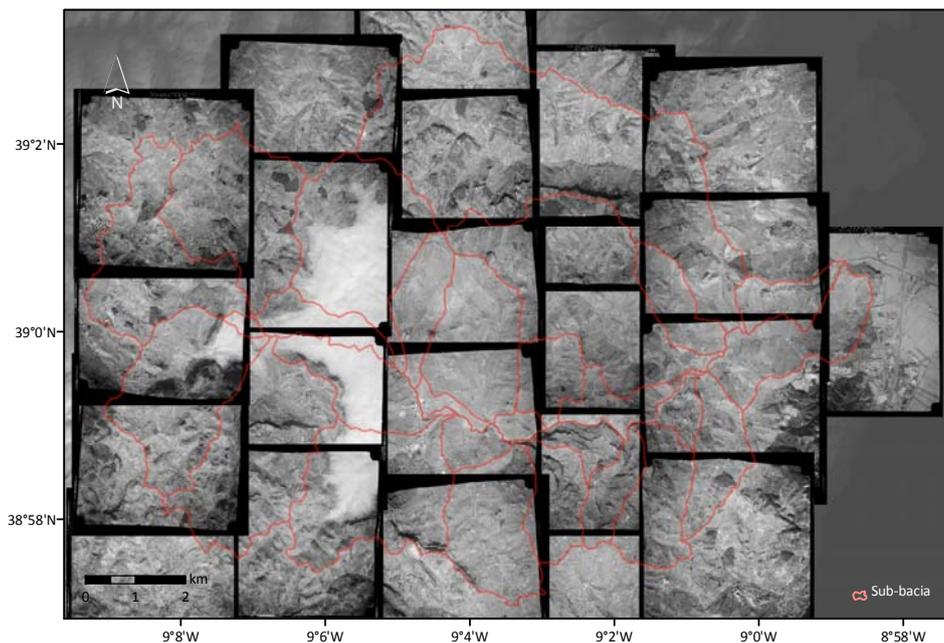


Figura 10 – Processo de georreferenciação das fotografias aéreas através de uma rede de pontos de controlo baseados nas coordenadas de cada ponto na imagem “fotografia aérea” e na imagem de referência “ortofotomapa”. A) Distribuição dos pontos de controlo, cada par de sinal + de cor verde e vermelha representa os erros de posicionamento da fotografia aérea em relação à imagem de referência; B) Imagem ajustada através da aplicação da função spline (os resíduos neste caso são de 0 m); C) matriz de erros anteriores à aplicação da função Spline. Fonte: Oliveira (2012).



*Figura 11 – Mosaico de fotografias aéreas criado para o voo de 1983 na área da bacia do Rio Grande da Pipa. Fonte: Oliveira (2012).*

Como informação auxiliar à fotointerpretação, utilizou-se a sobreposição da altimetria à escala de 1/10.000. A presença de elementos lineares ou circulares facilmente confundíveis com cicatrizes de movimentos de vertente podem ser validados através da sobreposição de curvas de nível e verificação da concordância com o elemento identificado. Se um elemento linear, que pode ser interpretado como parte de uma cicatriz, se encontrar alinhado paralelamente à linha de maior inclinação da vertente, então o mais certo é que se trata de um ravinamento (Fig. 12).



*Figura 12 – Exemplos de “falsos” elementos lineares que podem ser confundidos na fotointerpretação monoscópica com movimentos de vertente. Neste caso, pela sobreposição da altimetria facilmente se atribui o seu significado a processos de ravinamento. Fonte: Oliveira (2012).*

### - Inventário baseado na fotointerpretação de ortofotomapas

A interpretação de ortofotomapas, para a produção de inventários de movimentos de vertente tem ganho destaque nos últimos tempos devido à facilidade com que estes são obtidos, devido à qualidade da imagem e pelo facto das imagens já se encontrarem ortorectificadas. No caso da bacia do RGP foram utilizados quatro ortofotomapas de diferentes datas (2003, 2004, 2007 e 2012).

Da fotointerpretação resultou a identificação de um número bastante reduzido de movimentos de vertente (Fig. 13), fruto sobretudo de corresponderem a imagens distantes no tempo das datas dos principais eventos de instabilidade regional com expressão na área de estudo. Estes movimentos de vertente foram posteriormente validados através de trabalho de campo.



*Figura 13 – Exemplo de um movimento de vertente identificado através da fotointerpretação de ortofotomapa. Fonte: Oliveira (2012).*

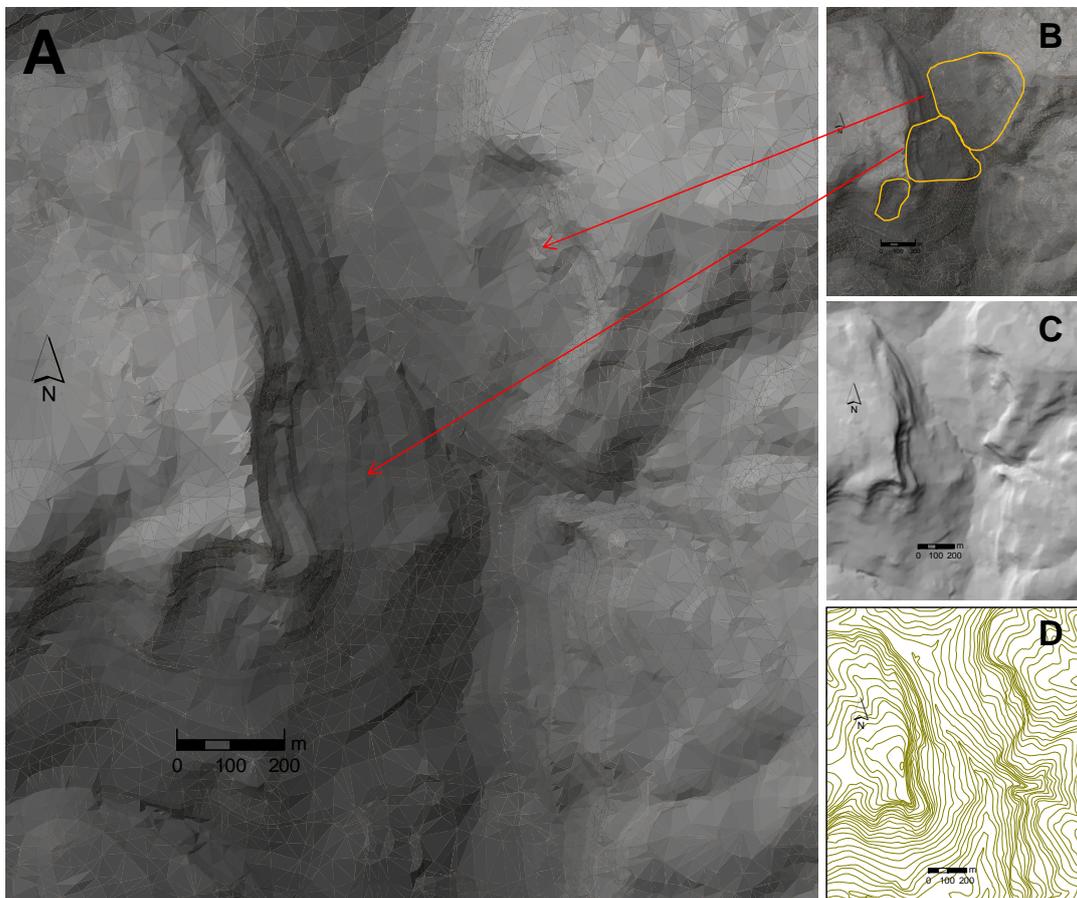
### 3.2.3. OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

A inventariação de movimentos de vertente teve em consideração outras fontes de informação cartográfica e documental que permitiram ajudar a tornar mais completo o inventário para a bacia do RGP.

A interpretação topográfica a partir de mapas de curvas de nível, declives ou mapas de relevo sombreado (*shaded relief*) constitui uma técnica fundamental, a par com a fotointerpretação, na determinação da instabilidade à escala regional e local (Wills e McCrink, 2002). Neste sentido foram explorados o Modelo Numérico de Elevação (MNE), o mapa topográfico (altimetria na escala de 1:10.000) e o modelo de relevo

sombreado (*hillshade* com um azimute de 315° N e ângulo de 45°) (Fig. 14).

As fontes documentais foram particularmente interessantes, no sentido em que permitiram redesenhar alguns dos movimentos previamente cartografados com trabalho de campo (Fig. 15), cujas marcas de instabilidade se encontravam degradadas. Os tipos de documentos consultados foram trabalhos académicos, relatórios e mapas de campo, e fotografias de campo antigas.



*Figura 14 – Modelo Numérico de Elevação (A), relevo sombreado (hillshade) (C), e mapa topográfico (D) utilizados na identificação de movimentos de vertente (B). Fonte: Oliveira (2012).*



Figura 15– Fonte de movimentos de vertente provenientes de fotografias (adaptado de Matos, 2008) (A) ou de cartografia geomorfológica de pormenor (Machado, 1991) (B).

## 2. RESULTADOS

Na bacia do Rio Grande da Pipa (RGP), foram inventariados 1434 movimentos de vertente (Fig. 16) que correspondem a uma área total instabilizada de 6.484.402,1 m<sup>2</sup>, cerca de 5,9% da área de estudo (aproximadamente 110,6 km<sup>2</sup>) e a uma densidade de 13 movimentos de vertente/km<sup>2</sup>. A densidade expressa pela área instabilizada é de 58.629 m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>. A dimensão média dos movimentos cartografados foi de 4698 m<sup>2</sup>, e a dimensão máxima e mínima dos movimentos inventariados foi de 262.194 m<sup>2</sup> e 6,6 m<sup>2</sup>, respectivamente.

Da análise da Fig. 16, podemos inferir a presença de uma cintura de deformação, onde ocorrem preferencialmente os deslizamentos rotacionais, geralmente profundos e de maiores dimensões. O limite montante e exterior desta faixa coincidem genericamente com o contacto entre duas unidades litológicas: a montante calcários corálicos compactos e a jusante um complexo de argilas e margas com intercalações calcárias de grande espessura (>800 m) (cf. Fig. 1).

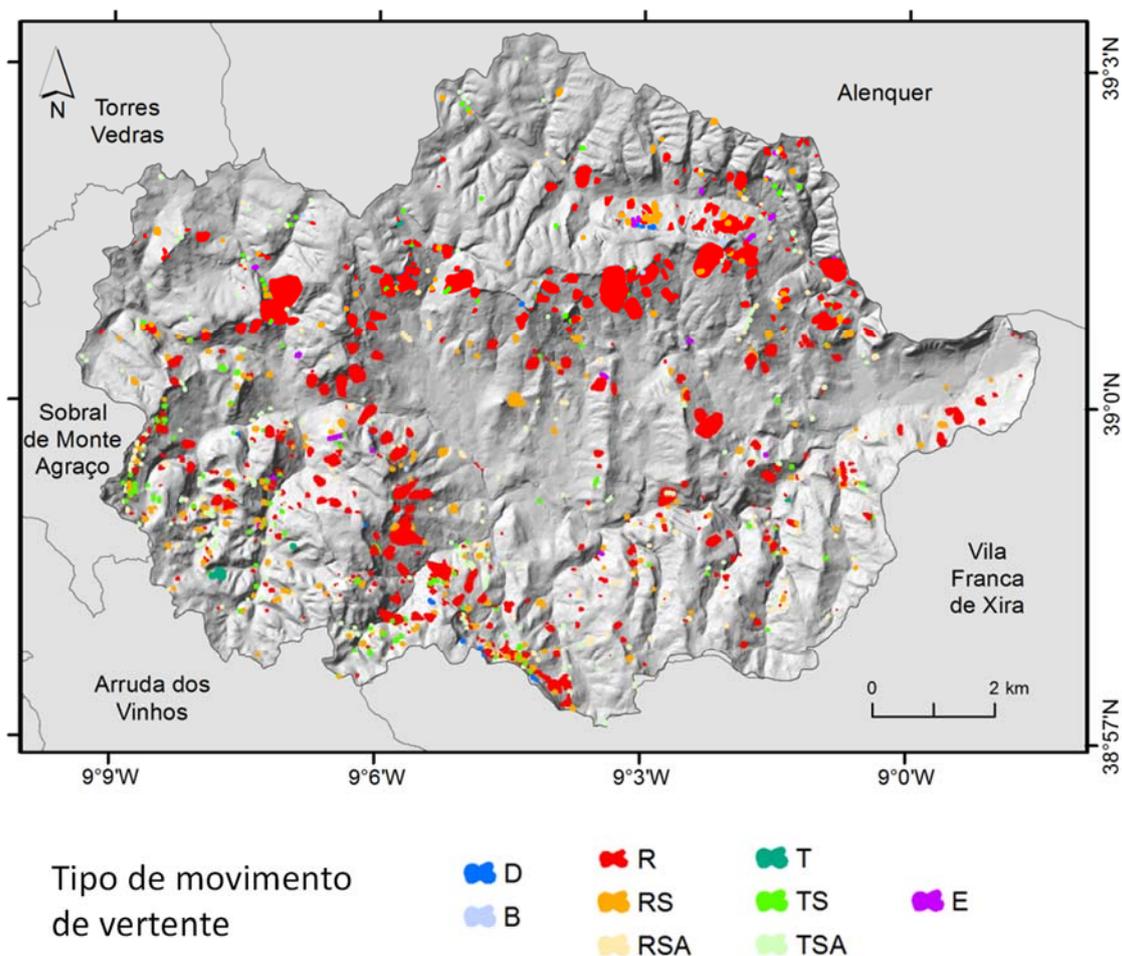


Figura 16 – Inventário dos 1434 movimentos de vertente, separados por tipo de movimento. D) Desabamento; B) Balançamento; R) Deslizamento rotacional profundo; RS) Deslizamento rotacional superficial; RSA) Deslizamento rotacional superficial em contexto antrópico; T) Deslizamento translacional profundo; TS) Deslizamento translacional superficial; TSA) Deslizamento translacional superficial em contexto antrópico; E) Escoada.

As Fig. 17 e 18 traduzem o peso relativo de cada tipo de movimento de vertente no conjunto dos movimentos de vertente inventariados, em termos de número e área instabilizada, respetivamente. Na Tabela 2 são sistematizadas as características morfométricas e densidade de movimentos de vertente na área de estudo por tipo de movimento de vertente.

Os deslizamentos rotacionais no seu conjunto (R, RS e RSA) representam 69% do total da instabilidade ocorrida na bacia, destacando-se os deslizamentos rotacionais profundos (R) com 39,9% do número de ocorrências. Os deslizamentos rotacionais superficiais (RS) representam cerca de 18,5% do total de ocorrências e os deslizamentos rotacionais

superficiais que têm origem em taludes antrópicos (estradas, caminhos) (RSA) representam 10,5% dos movimentos de vertente identificados na bacia do RGP. Estão ainda igualmente bem representados, em número, os deslizamentos translacionais (TS) com 11,4% do total de ocorrências e os deslizamentos translacionais superficiais em taludes construídos (TSA), com 15,2% do total de ocorrências. Os restantes tipos de movimentos de vertente não ultrapassam os 4,5% do total de ocorrências (D, B, T, E) (Fig. 17; Tabela 2).

Relativamente à área instabilizada, os deslizamentos rotacionais no seu conjunto são responsáveis por 98% da área instabilizada na bacia do RGP (Fig. 18), sendo que 93,1% correspondem a deslizamentos rotacionais profundos (R).

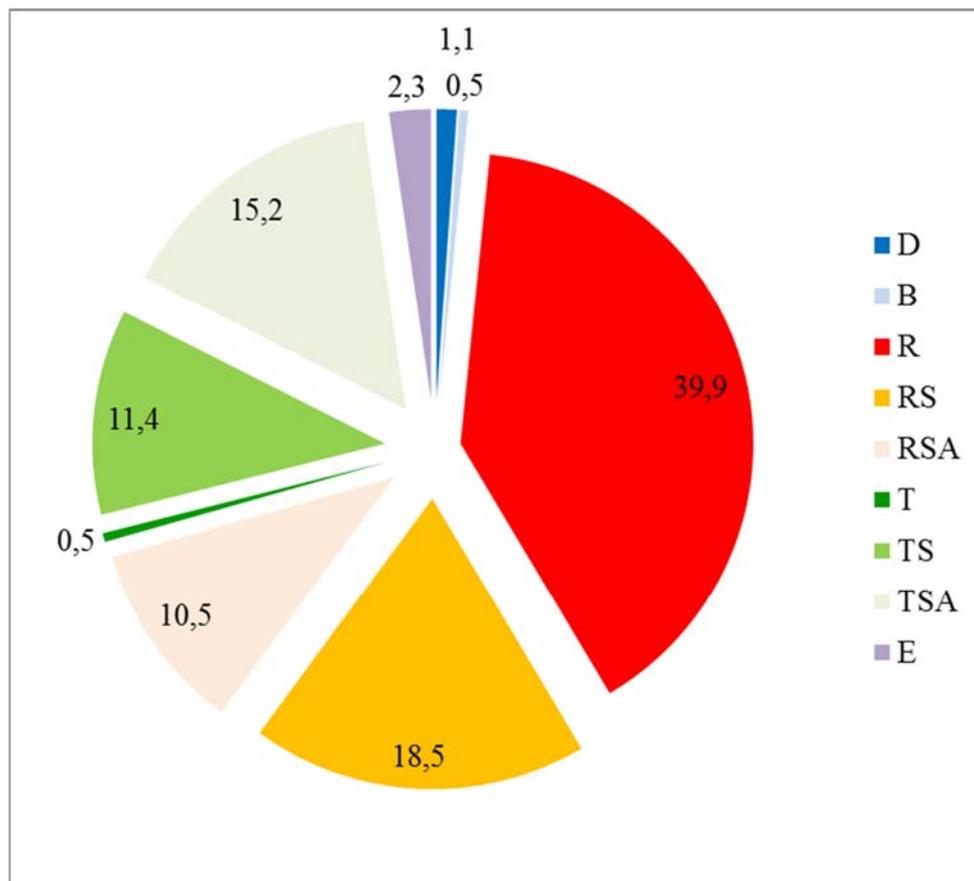


Figura 17 – Frequência relativa do número de movimentos de vertente por tipo de movimento. D) Desabamento; B) Balançamento; R) Deslizamento rotacional profundo; RS) Deslizamento rotacional superficial; RSA) Deslizamento rotacional superficial em contexto antrópico; T) Deslizamento translacional profundo; TS) Deslizamento translacional superficial; TSA) Deslizamento translacional superficial em contexto antrópico; E) Escoada

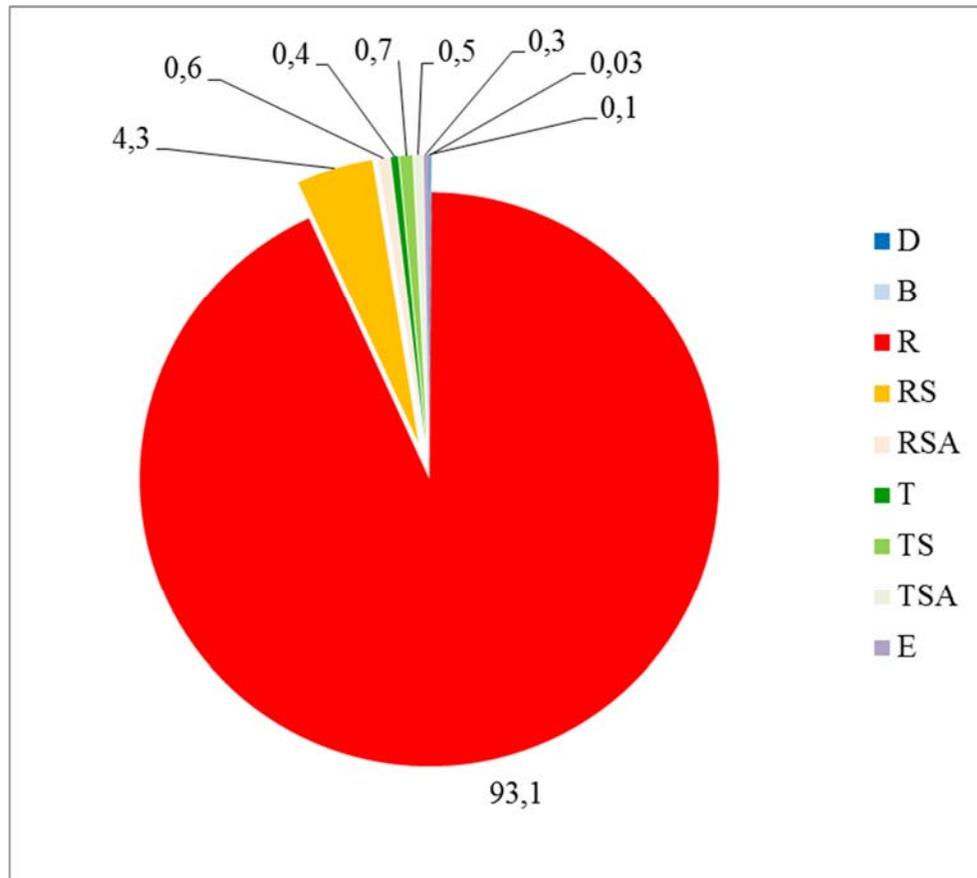


Figura 18 – Frequência relativa de área instabilizada por tipo de movimento de vertente. D) Desabamento; B) Balançamento; R) Deslizamento rotacional profundo; RS) Deslizamento rotacional superficial; RSA) Deslizamento rotacional superficial em contexto antrópico; T) Deslizamento translacional profundo; TS) Deslizamento translacional superficial; TSA) Deslizamento translacional superficial em contexto antrópico; E) Escoada

*Tabela 2 – Principais características morfométricas e de densidade dos diferentes tipos de movimentos de vertente inventariados na bacia do Rio Grande da Pipa.*

	<b>D</b>	<b>B</b>	<b>R</b>	<b>RS</b>	<b>RSA</b>	<b>T</b>	<b>TS</b>	<b>TSA</b>	<b>E</b>	<b>TOTAL</b>
# mov. vertente	16,0	7,0	572	266	151,0	7,0	164,0	218,0	33,0	1434
# mov. vertente/km <sup>2</sup>	0,1	0,1	5,2	2,4	1,4	0,06	1,5	2,0	0,3	13
Área total (m <sup>2</sup> )	5814,0	1774,6	6034204	277399	41618,8	26463,7	46164,3	31930,4	19033,2	6484402,1
Área total (m <sup>2</sup> )/km <sup>2</sup>	52,6	16,0	54558,8	2508,1	376,3	239,3	417,4	288,7	172,1	58629,3
Área mínima (m <sup>2</sup> )	34,8	28,2	46,4	33,9	7,7	272,6	12,4	6,6	46,5	6,6
Área máxima (m <sup>2</sup> )	1232,0	1149,3	262194,4	14720,3	1837,0	15689,5	2815,2	2926,0	2892,6	262194,4
Área média (m <sup>2</sup> )	363,4	253,5	10969,4	1090,1	275,6	3780,5	281,5	146,5	576,8	4698,2
Desvio padrão (m <sup>2</sup> )	334,5	371,7	22742,3	1519,4	315,0	5054,9	354,6	295,2	617,8	15203,8

### 3. CONCLUSÕES

A bacia hidrográfica do Rio Grande da Pipa corresponde, do ponto de vista geomorfológico, a umas das áreas com maior propensão para a ocorrência de movimentos de vertente, quer a nível regional, quer a nível nacional. Um contexto geológico dominado pela presença de rochas brandas de grande deformabilidade e rochas mais resistentes dúcteis, estruturas dobradas ou em monoclinas e declives moderados favorece a ocorrência das manifestações de instabilidade.

Na área de estudo, foram inventariados através de trabalho de campo e de fotointerpretação mais de 1400 movimentos de vertente. Estes afetam uma área superior a 6 km<sup>2</sup> e a sua densidade é de 13 movimentos de vertente/km<sup>2</sup>. Os deslizamentos rotacionais representam quase 70% das manifestações de instabilidade, e 98% da área instabilizada, sendo que mais de metade são deslizamentos rotacionais profundos, e são responsáveis por elevados níveis de danos em estradas e edifícios. Os deslizamentos superficiais (rotacionais e translacionais) ocorridos em vertentes naturais e taludes representam os tipos de movimentos de vertente mais frequentes na bacia (55% das ocorrências). As escoadas, desabamentos e balançamentos têm uma reduzida expressão na área de estudo.

Os produtos cartográficos com origem em aerofotogrametria, deteção remota e cartografia topográfica de base, com verificação por trabalho de campo, revelam-se como ferramentas imprescindíveis nos processos de inventariação de movimento de vertente.

Os inventários de movimentos de vertente para outras áreas de estudo em Portugal no projeto RISKCOAST, estão efetuados e seguem uma abordagem similar à do estudo de caso apresentado no presente relatório devidamente adaptada ao seu contexto geomorfológico.

### 4. BIBLIOGRAFIA

Aber, J.S.; Marzoff, I.; Ries, J. B. (2010) – Small-format aerial photography. Principles, techniques and geosciences applications. Elsevier.

Brabb, E.E. (1991) The world landslide problem. Episodes, 14-1: 52-61.

Cruden, D. M.; Varnes, D. J. (1996) – Landslide types and processes in Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Eds.), Landslides investigation and

mitigation. Transportation Research Board. National Academic Press, Washington D. C.. Special Report 247: 36 – 75.

Dikau, R.; Brunsden, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. (Eds.) (1996a) - Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. John Wiley & Sons, Chichester.

Dikau, R.; Schrott, L.; Dehn, M, (1996b) - Topples in Dikau, R.; Brunsden, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. (Eds.), Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. John Wiley & Sons, Chichester: 29 - 41.

Guzzetti, F. (2005) – Landslide hazard and risk assessment – concepts, methods and tools for the detection and mapping of landslides, for landslides susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation. Dissertação de doutoramento apresentada à Mathemachinaturwissenschaftlichen Fakultät da Rheinischen Friedrich-Wilhelms, Universidade de Bona.

Guzzetti, F.; Cardinali, M.; Reichenbach, P.; Carrara, A. (2000) – Comparing landslide maps: A case study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy. Environmental Management. 25(3): 247-263.

Guzzetti, F.; Mondini, A. C.; Cardinali, M.; Fiorucci, F.; Santangelo, M.; Chang, K. T. (2012) - Landslide inventory maps: new tools for and old problem. Earth-Science Reviews. 112: 42 - 66. doi: 10.1016/j.earscirev.2012.02.001

Hantz, D.; Vengeon, J.M.; Dussauge-Peisser, C. (2003) – An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. Natural Hazard and Earth System Sciences. 3:1-9.

Ibsen, M.-L.; Brunsden, D.; Bromhead, E.; Collison, A. (1996b) – Slab slide in Dikau, R.; Brunsden, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. (Eds.) Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. John Wiley & Sons, Chichester. 78-84.

IGS-WP/WLI – International Geotechnical Societies e Working Party on World Landslide Inventory (1990) - A suggested method for reporting a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. 41: 5 – 12.

Machado, M. J. (1991) - Contribuição para o estudo da bacia-vertente do Rio Grande da Pipa. Universidade de Lisboa.

Matos, L. M. P. de (2008) – Estabilidade de taludes em rochas silto-argilosas – Técnicas de remediação para roturas superficiais. Dissertação

de mestrado em Geologia, especialização em Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território, apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Parise, M. (2001) – Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Physics and Chemistry of the Earth*. 26(9): 697-703.

Rib, H. T.; Liang, T. (1978) - Recognition and identification, in Schuster, R. L. and Krizek, R. J. (Eds.) *Landslide Analysis and Control*, National Academy of Sciences, Transportation Research Board Special Report 176, Washington, 34–80

Soeters, R.; van Westen, C. L. (1996) – Slope instability recognition, analysis, and zonation in Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Eds.), *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board. National Academic Press, Washington D. C.. Special Report 247: 129 – 177.

van Westen, C. J.; van Asch, T. W. J.; Soeters, R. (2006) - Landslide hazards and risk zonation - why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 65: 167 – 184.

Varnes, D. J. (1978) – Slope movement types and processes in Schuster, R. L.; Krizek, R. J. (Eds.) *Landslides analysis and control*. Transportation Research Board Special Report. Washington D. C. 176: 11 – 33.

Varnes, D. J.; International Association of Engineering Geology – Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes (1984) – *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. UNESCO, Paris.

Walstra, J.; Chandler, J.H.; Dixon, N.; Dijkstra, T.A. (2004) – Extracting landslide movements from historical aerial photographs in Lacerda, W.; Ehrlich, M.; Fontoura, S.; Sayão, A. (Eds.) *Landslides: Evaluation and Stabilization*. Vol. I. Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides, A.A. Balkema Publishers, Leiden: 843-850.

Walstra, J.; Dixon, N. & Chandler, J.H. (2007a) – Historical aerial photographs for landslide assessment: two case histories. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrology*. Geological Society of London. 40: 315-332.

Walstra, J.; Chandler, J.H.; Dixon, N. & Dijkstra, T.A. (2007b) – Aerial photography and digital photogrammetry for landslide monitoring in

Teeuw, R.M. (Ed.) Mapping Hazardous Terrain using remote sensing. Geological Society, London, Special publications, 283: 53-63.

Wills, C. J.; McCrink, T. P. (2002) – Comparing landslide inventories: The map depends on the method. Environmental & Engineering Geoscience. The Geological Society of America. Vol. VIII-4: 279-293.

Wolf, P.R. (1983) Elements of Photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing. Second edition, McGraw-Hill Book Company, New York.

WP/WLI – (International Geotechnical Societies) Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993a). A suggested method for describing the activity of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. 47: 53-57.

WP/WLI – (International Geotechnical Societies) Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993b). Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies .

Zanutta, A.; Baldi, P.; Bitelli, G.; Cardinali, M.; Carrara, A. (2006) – Qualitative and quantitative photogrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis. Annals of Geophysics. 49(4/5): 1067-1080.

Zêzere, J. L. (1997) – Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa. Dissertação de doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa.