

A AVALIAÇÃO DO RISCO DE ALUVIÕES NA ILHA DA MADEIRA

Rodrigo Proença de Oliveira¹ (rpo@civil.ist.utl.pt), António Betâmio de Almeida¹, Jorge Sousa¹, Maria João Pereira¹, Maria Manuela Portela¹, Miguel Azevedo Coutinho¹, Rui Ferreira¹, Sérgio Lopes²

¹Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georecursos, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

²Laboratório Regional de Engenharia Civil, Funchal, Madeira-Portugal

RESUMO

Desde o início do século XIX que ocorreram na Ilha da Madeira cerca de 30 aluviões de intensidade significativa, caracterizadas por cheias rápidas e violentas que transportam concentrações elevadas de material sólido. É de destacar a ocorrência de 1803, ano em que pereceram cerca de 1000 pessoas, vítimas das inundações catastróficas que se verificaram em toda a ilha, mas particularmente na região do Funchal.

O evento recente mais grave ocorreu no dia 20 de Fevereiro de 2010. Na sequência de um prolongado período chuvoso na ilha da Madeira, uma situação meteorológica adversa provocou uma aluvião excepcional que atingiu, com elevada intensidade, alguns concelhos da vertente Sul da ilha, em particular os concelhos do Funchal e da Ribeira Brava. São de lamentar dezenas de vítimas mortais e alguns desaparecidos, bem como elevados danos materiais e a destruição de infra-estruturas.

Este evento levou a Secretaria Regional do Equipamento Social (SRES) na Região Autónoma da Madeira a solicitar ao Instituto Superior Técnico (IST), à Universidade da Madeira (UMa) e ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) a realização de um estudo que permitisse avaliar e caracterizar os riscos associados a este tipo de cheias (aluviões), estabelecer os princípios que devem orientar as intervenções para defesa contra os seus efeitos e fornecer elementos que permitam justificar os investimentos a realizar na recuperação e na protecção das populações e infra-estruturas.

O artigo apresenta a metodologia utilizada no estudo e as principais conclusões alcançadas. São também indicadas algumas pistas para os futuros trabalhos de monitorização e investigação sobre este tema.

INTRODUÇÃO

A Madeira é a maior ilha do arquipélago como o mesmo nome, uma região autónoma de Portugal que se localiza no Atlântico Norte, 640 km a ocidente de Casablanca. Com uma origem vulcânica, a ilha apresenta uma área com 740 km², um comprimento de 57 km na direcção Este-Oeste e uma largura de 22 km na direcção Norte-Sul. A sua cordilheira montanhosa central possui uma altitude média de 1200 m, sendo vários os picos que ultrapassam os 1600 m. O Pico Ruivo, com 1862 m, é o ponto mais alto da ilha.

A rede hidrográfica é composta por ribeiras que se desenvolvem da cordilheira montanhosa central para a costa, em vales profundos e estreitos de declive acentuado. Estas ribeiras, com bacias hidrográficas com áreas entre 10 e 50 km², apresentam um regime de escoamento intermitente e torrencial.

O relevo irregular e montanhoso é o factor explicativo da perigosidade natural predominante, normalmente associada a eventos de precipitação intensa. Salientam-se os movimentos de terreno, em particular os deslizamentos, ou a queda de blocos nas vertentes de elevado declive e as cheias e inundações repentinas e intensas nos vales muito estreitos e sem planícies de cheia. Estas cheias, designadas por aluviões, correntes de detritos ou *debris flow*, caracterizam-se por concentrações elevadas de material sólido, incluindo blocos de grandes dimensões, que conferem ao escoamento um enorme poder destrutivo.

A geomorfologia da Madeira condiciona fortemente a ocupação do território da ilha e tem levado as populações a assumirem, de forma consciente ou inconsciente, riscos não desprezáveis, instalando-se nos cones de dejectão na parte terminal das ribeiras, como é o caso, entre outros, dos principais aglomerados urbanos da vertente sul da ilha, como Machico, Funchal e Ribeira Brava. Mais recentemente, a pressão urbanística tem conduzido à ocupação das cotas mais elevadas das vertentes, em locais com um risco acentuado de movimentos de terreno.

O evento meteorológico de 20 de Fevereiro de 2010, atingiu com elevada intensidade os concelhos do Funchal e da Ribeira Brava, sendo de lamentar dezenas de vítimas mortais e alguns desaparecidos, bem como elevados danos materiais e a destruição de infra-estruturas. Este evento levou a Secretaria Regional do Equipamento Social (SRES) na Região Autónoma da Madeira a solicitar ao Instituto Superior Técnico (IST), à Universidade da Madeira (UMa) e ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) a realização de um estudo que permitisse avaliar e caracterizar os riscos associados a este tipo de cheias (aluviões), de estabelecer os princípios que devem orientar as intervenções para defesa contra os seus efeitos e de fornecer elementos que permitam justificar os investimentos a realizar na recuperação e na protecção das populações e infra-estruturas.



Figura 1- Alguns aspectos da aluvião de 20 de Fevereiro de 2010 na cidade do Funchal

O Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira (EARAM, 2010) foi realizado entre Maio e Dezembro de 2010 e abrangeu as bacias hidrográficas de cinco ribeiras da vertente sul da Ilha da Madeira: Ribeira da Tabua, Ribeira Brava, São João, Santa Lúzia e João Gomes (Figura 2). No Quadro 1 são apresentados alguns dados gerais relativos às bacias hidrográficas das ribeiras em análise e a Figura 3 apresenta os perfis longitudinais das mesmas ribeiras. Estes elementos incluem também a bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos a qual, não obstante não ter sido objecto do estudo, tem interesse dada a sua dimensão, localização e características semelhantes às das bacias consideradas na análise.

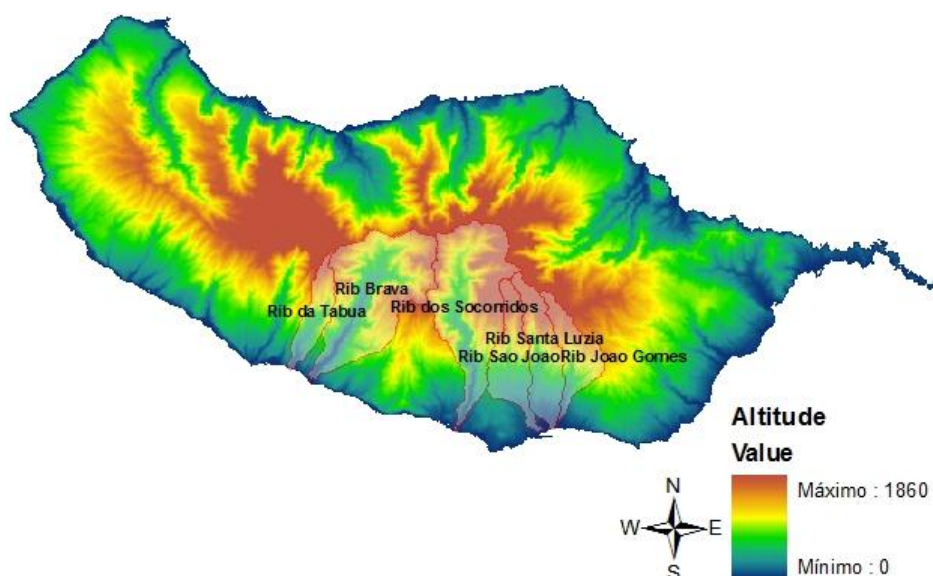


Figura 2 - Localização das bacias hidrográficas objecto de estudo e da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos.

Quadro 1 - Dados gerais sobre as bacias hidrográficas objecto de estudo.

Nome da bacia	Área (km ²)	Altitude Máxima (m)	Declive médio (°)	Comprimento total da rede de drenagem em função da área mínima a montante (m)		Densidade de drenagem em função da área mínima a montante (km/km ²)	
				A > 1 ha	A > 1 km ²	A > 1 ha	A > 1 km ²
Ribeira da Tabua	8,8	1572	33	49.358	11.279	5,61	1,28
Ribeira Brava	40,9	1689	37	247.167	38.701	6,04	0,95
Ribeira dos Socorridos	38,7	1860	43	223.602	43.020	5,78	1,11
Ribeira de São João	14,7	1763	25	82.676	19.490	5,64	1,33
Ribeira de Santa Lúzia	15,6	1785	27	92.162	20.035	5,90	1,28
Ribeira de João Gomes	11,4	1595	25	60.483	15.372	5,30	1,35

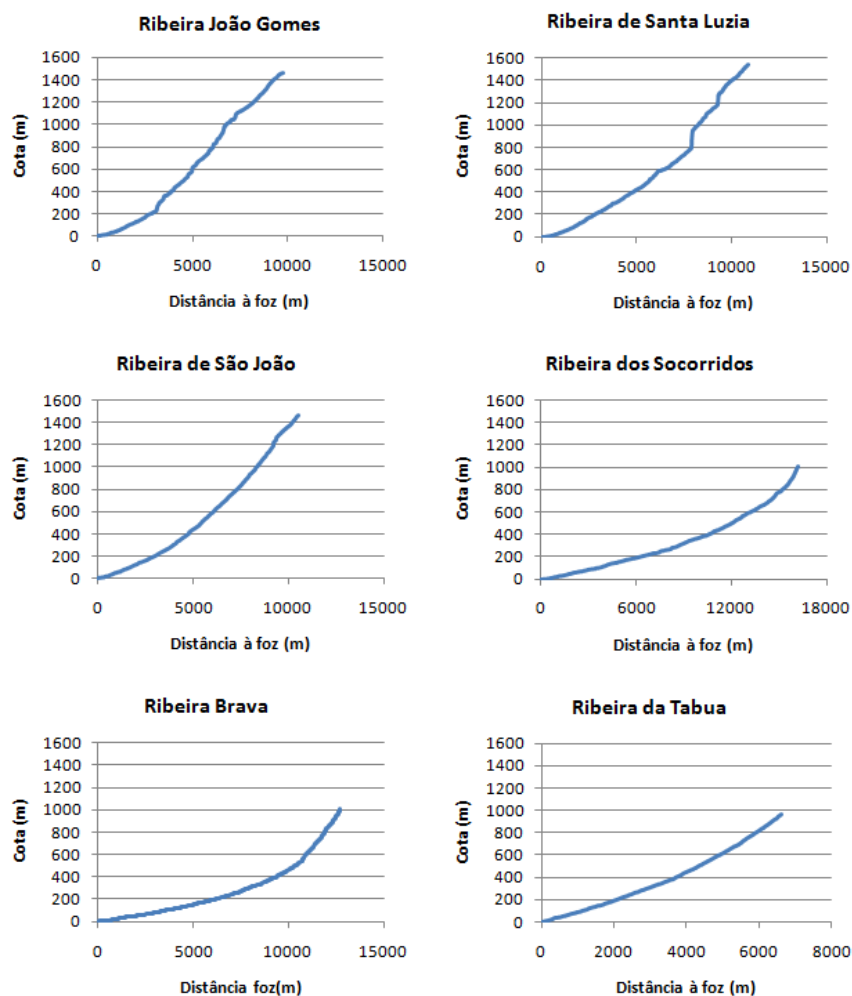


Figura 3 - Perfis longitudinais das ribeiras em análise e da ribeira dos Socorridos.

ANTECEDENTES

O fenómeno das aluviões na Madeira tem sido referenciado em vários trabalhos de carácter mais ou menos científico. (Quintal, 1999a e 1999b, Lopes 2003, Lopes & Aguiar, 2009a e 2009b). O Quadro 2 sintetiza as principais aluviões ocorridos nos séculos XIX e XX e no início do sec. XXI e as suas principais consequências, sendo de destacar a aluvião de 1803 no concelho do Funchal.

Na sequência da aluvião de 1803, as ribeiras da cidade do Funchal foram canalizadas entre 1804 e 1806, sob a direcção do Brigadeiro Reinaldo Oudinot. Ao longo dos tempos têm vindo a ser executados vários estudos e intervenções para regularização dos leitos das ribeiras e protecção de zonas urbanas em expansão. Nas últimas dezenas de anos são de destacar os estudos da HP (1993) e do LNEC (1994). Refira-se também que o Plano Regional da Água da Madeira (PRAM) (SRA/INAG, 2003) identifica este tipo de risco, descreve as respectivas características e propõe algumas medidas específicas. Não obstante estas intervenções, as aluviões continuaram infelizmente a provocar vítimas e danos, mas nunca com a gravidade do evento de 20/2/2010.

Quadro 2 - Síntese histórica das principais aluviões da ilha da Madeira.

Data	Zona	Vítimas e danos
9 de Outubro de 1803	Funchal	800 - 1000 vítimas
26 de Fevereiro de 1920	Funchal Ribeira Brava, Camacha	5 vítimas
6 de Março de 1929	S. Vicente	32 vítimas, 11 casas e 100 palheiros destruídos
30 de Dezembro de 1939	Madalena do Mar (principais danos)	4 vítimas
11 de Fevereiro de 1956	Curral das Freiras	2 vítimas
3 de Novembro de 1956	Machico, Santa Cruz	6 vítimas
3 a 6 de Janeiro de 1963	Ribeira Brava, Serra de Água	5 vítimas
9 de Janeiro de 1970	Ribeira Brava, Serra de Água	4 vítimas
21 de Setembro de 1972	Santo António	2 vítimas
20 de Dezembro de 1977	Estreito de Câmara de Lobos	4 vítimas e 45 desalojados
23 e 24 de Janeiro de 1979	Machico, Porto da Cruz, Camacha, Canhas, Calheta e Fajã do Penedo	14 vítimas
29 de Outubro de 1993	Por toda a ilha da Madeira	4 vítimas, 4 desaparecidas, 306 desalojados, 76 habitações afectadas e 27 feridos
5 e 6 de Março de 2001	Curral das Freiras e S. Vicente	5 vítimas (turistas alemães) e 120 pessoas desalojadas
22 Dezembro de 2009	Madalena do Mar e S. Vicente	Destruição de vias de comunicação e habitações

O EVENTO DE 20 DE FEVEREIRO DE 2009

O evento de 20/2/2010 ocorreu na sequência de um prolongado período chuvoso na ilha da Madeira. A precipitação acumulada de Outubro de 2009 a Fevereiro 2010 em vários postos de monitorização da ilha foi, em todos, superior a 1000 mm, variando entre 1084 mm no posto do LREC e 4054 mm, no posto *Areeiro-LREC* a 1590 m de altitude. Já no mês de Fevereiro de 2010 registaram-se valores significativos de precipitação diária, por vezes superiores a 100 mm, como foram os casos dos dias 2, 18 e 20 de Fevereiro.

O evento pluvioso do dia 20 de Fevereiro inicia-se 5h00 da madrugada, acentua-se a partir das 8h00 e mantém uma intensidade elevada até às 13h00. Perde intensidade a partir desta hora e termina por volta das 17h00. O período onde a precipitação foi mais intensa ocorreu em regra entre as 9h00 e as 12h00. A Figura 4 apresenta os valores da intensidade máxima de precipitação em função da duração da precipitação para vários postos, agrupados por zonas da ilha. As Figuras 4 a 8 apresentam a distribuição espacial da precipitação máxima acumulada em diversos períodos de tempo.

A análise destas figuras permite verificar que a quantidade de precipitação atingiu em certas áreas 20 mm, 60 mm e 100 mm, para respectivamente 10 minutos, 30 minutos e 60 minutos, o que corresponde a intensidades de precipitação entre 100 mm/h e 120 mm/h para durações da precipitação desta ordem de grandeza

Os valores de precipitação registados denotam, no entanto, uma acentuada variabilidade espacial em áreas muito próximas. Na região do Funchal, por exemplo, as quantidades horárias no posto *Trapiche* corresponderam com frequência a mais do dobro daquelas verificadas no posto *LREC*, localizado apenas a três quilómetros do anterior. Embora os máximos horários tenham ocorrido à mesma hora nos dois postos, entre as 9h00 e as 10h00, o posto *LREC* registou menos de metade (42,2 mm) do máximo do posto *Trapiche* (88,4 mm).

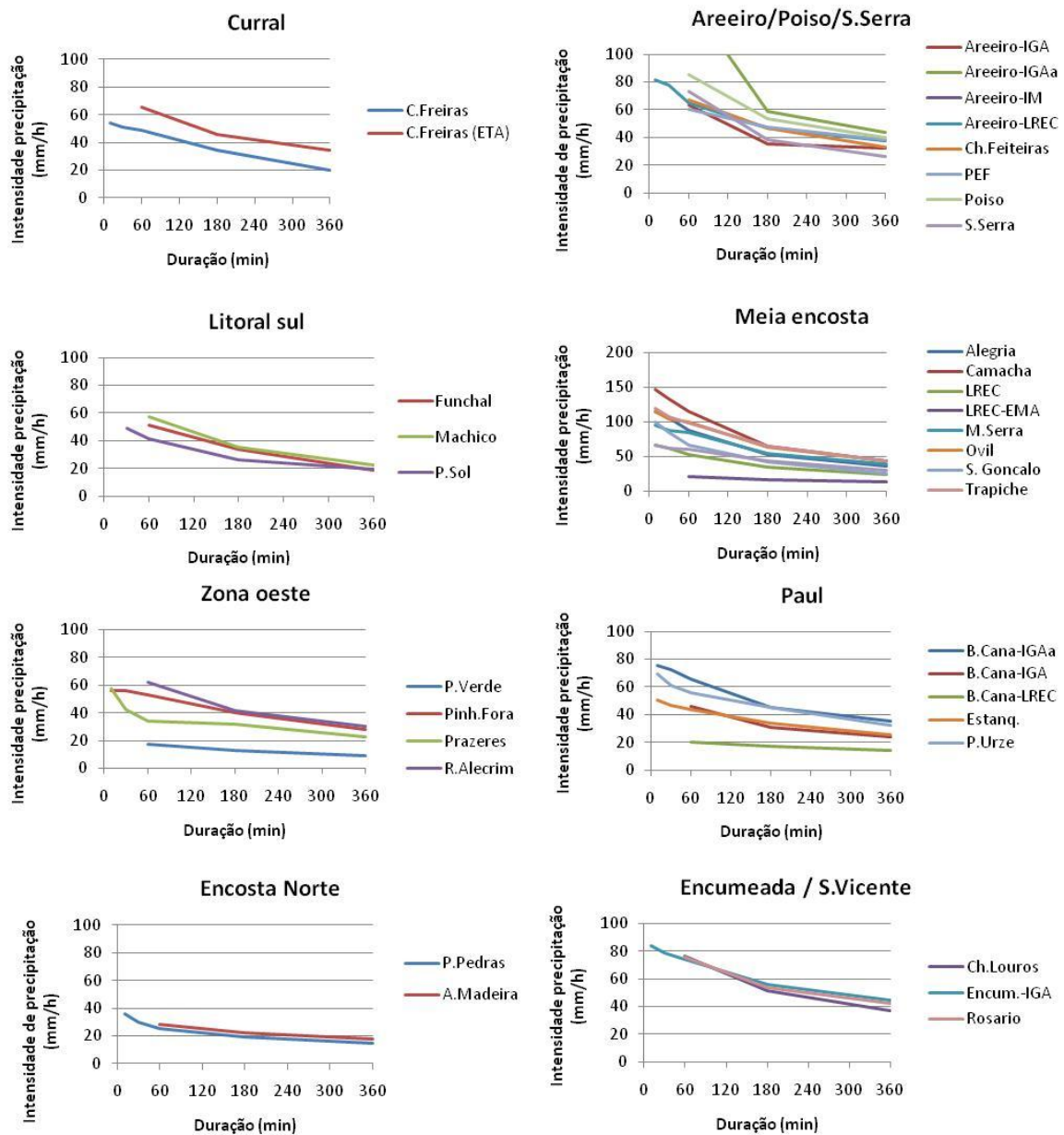


Figura 4 - Intensidade máxima de precipitação em função da duração para várias zonas de ilha.

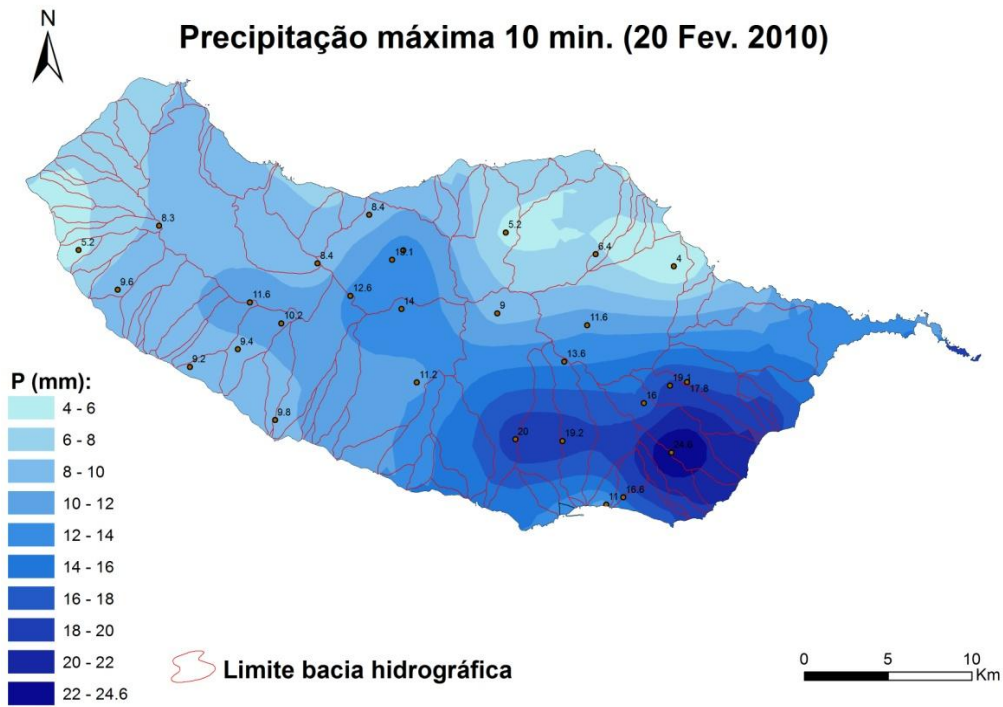


Figura 5 - Precipitação máxima acumulada em 10 minutos no dia 20 de Fevereiro.

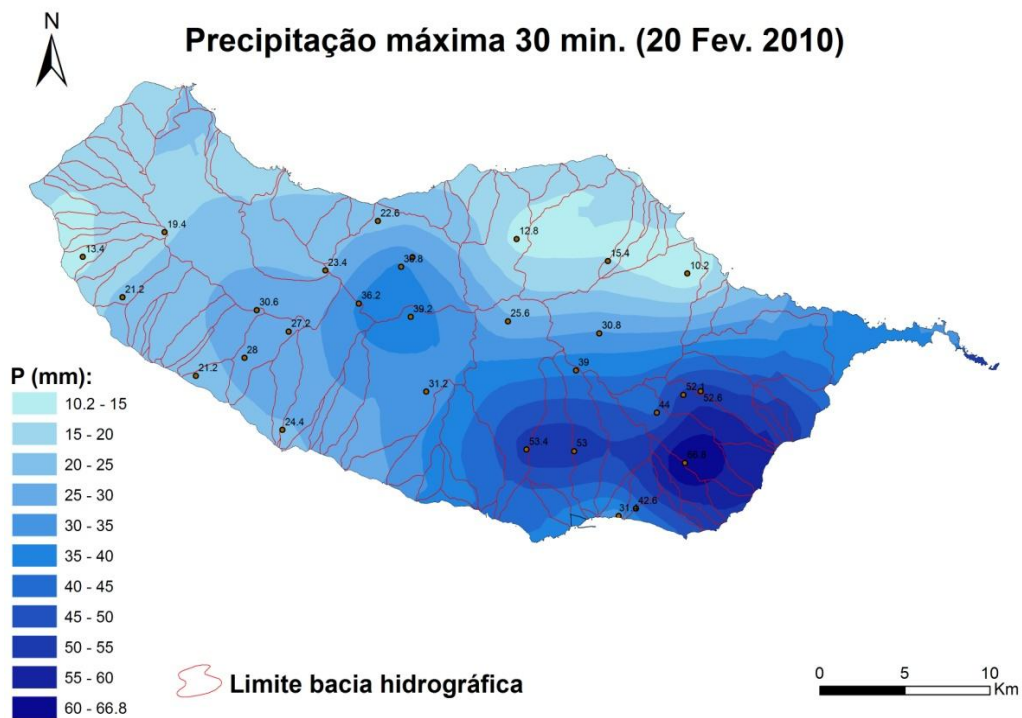


Figura 6 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 30 minutos, no dia 20 de Fevereiro.

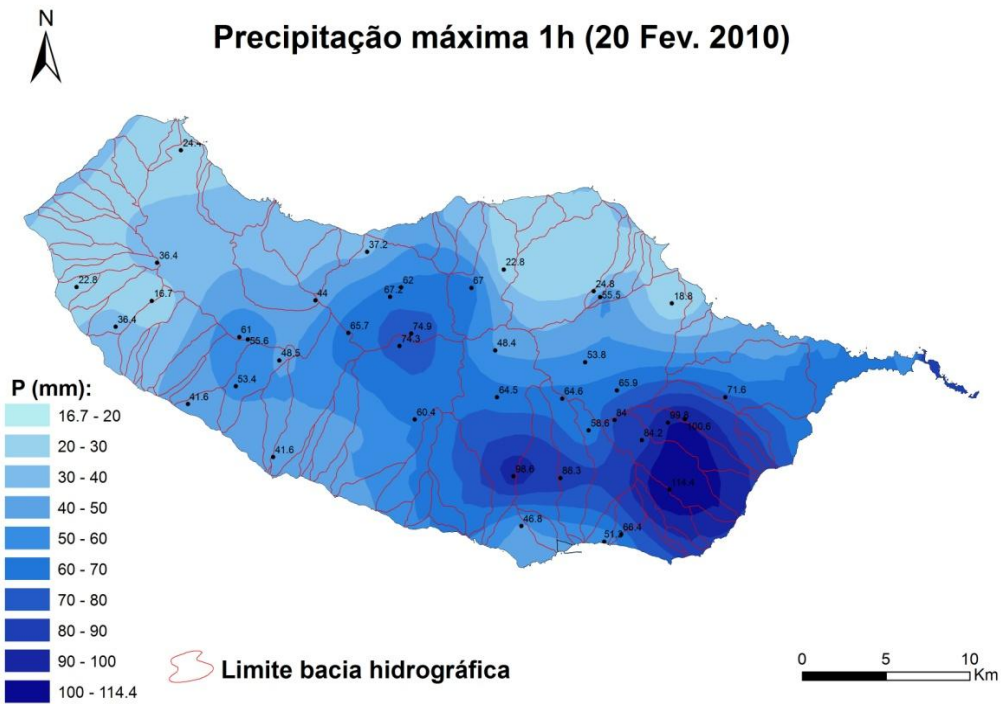


Figura 7 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 1 hora, no dia 20 de Fevereiro.

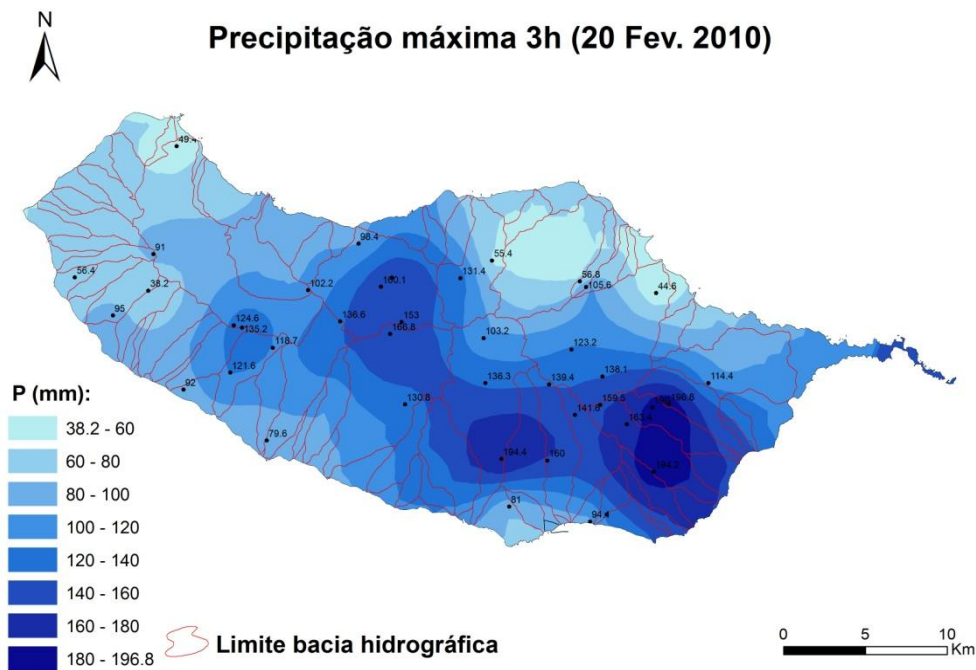


Figura 8 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 3 horas, no dia 20 de Fevereiro.

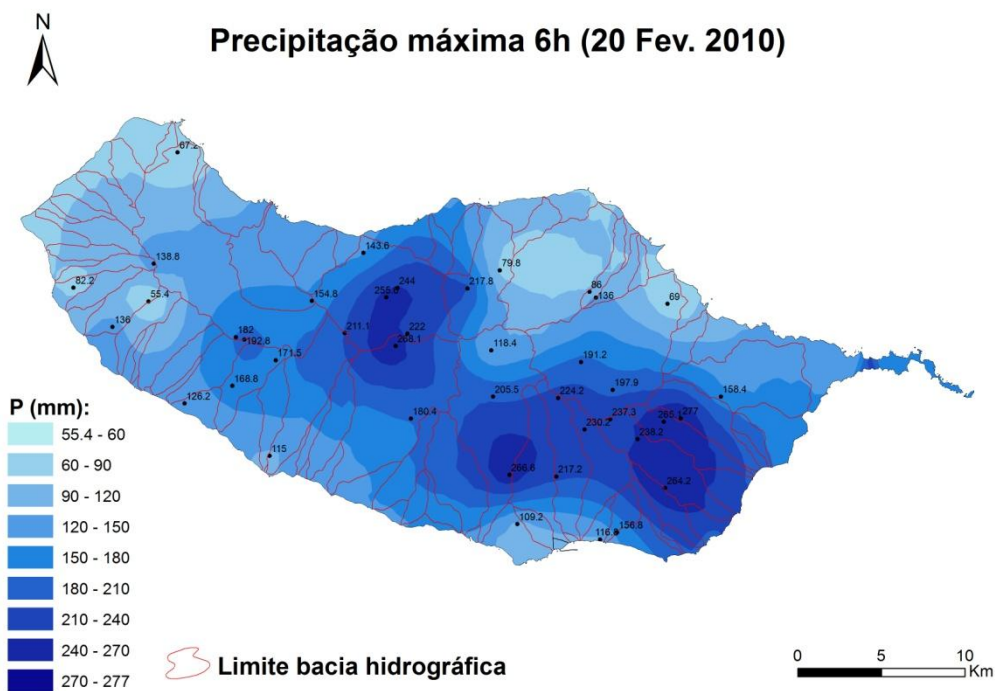


Figura 9 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 6 horas, no dia 20 de Fevereiro.

Na Figura 10 e na Figura 11 apresenta-se a distribuição do número de horas consecutivas em que a precipitação horária foi superior, respectivamente a 10 mm e 30 mm. Nas cabeceiras das ribeiras do concelho do Funchal, o número de horas consecutivas com precipitação horária superior a 10 mm ultrapassou as 9 horas, como comprovam os registos dos postos do *Areiro-LREC*, *Areiro-IGA* e *Camacha*. Em contraste, no posto *Curral das Freiras-LREC* e *Santo da Serra* este limiar foi ultrapassado apenas durante 3 horas e 4 horas consecutivas, respectivamente. Nos restantes postos ocorreram valores acima de 10 mm durante cinco ou mais horas consecutivas. O número de horas consecutivas com precipitação horária superior a 30 mm foi superior a 5 horas nas cabeceiras das ribeiras do Funchal e da ribeira Brava. Para avaliar o grau de excepcionalidade do evento analisaram-se os registos de precipitações horárias e em 10 minutos no posto udométrico do Funchal – Observatório, o único que possui um registo com uma extensão que permite uma análise estatística fidedigna dos seus valores. O período coberto pelos registos decorre entre de 1 de Janeiro de 1980 e 31 de Dezembro de 1995, para a precipitação horária, e entre 1 de Janeiro de 1996 e 30 de Junho de 2010, para a precipitação de 10 minutos. Concluiu-se que a precipitação no dia 20 de Fevereiro de 2010, registada no posto Funchal – Observatório, correspondeu a um período de retorno da ordem de 80 a 100 anos, para a duração de uma hora e a um período de retorno superior, da ordem de 1000 anos, para a duração de 6 a 12 horas.

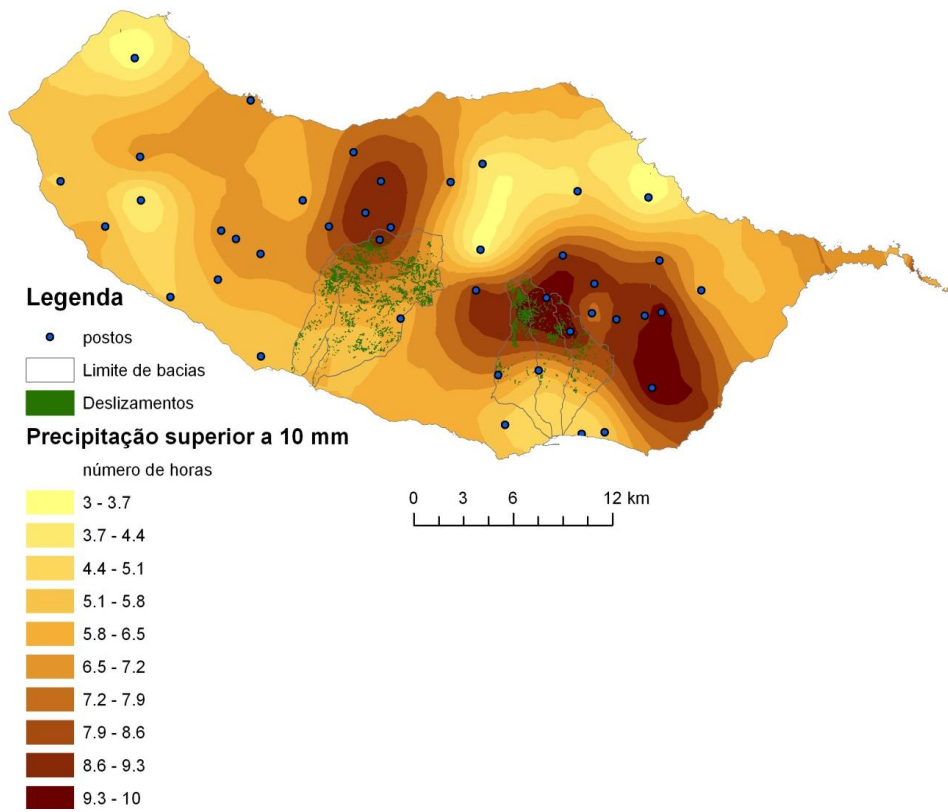


Figura 10 – Número de horas com precipitação superior a 10mm.

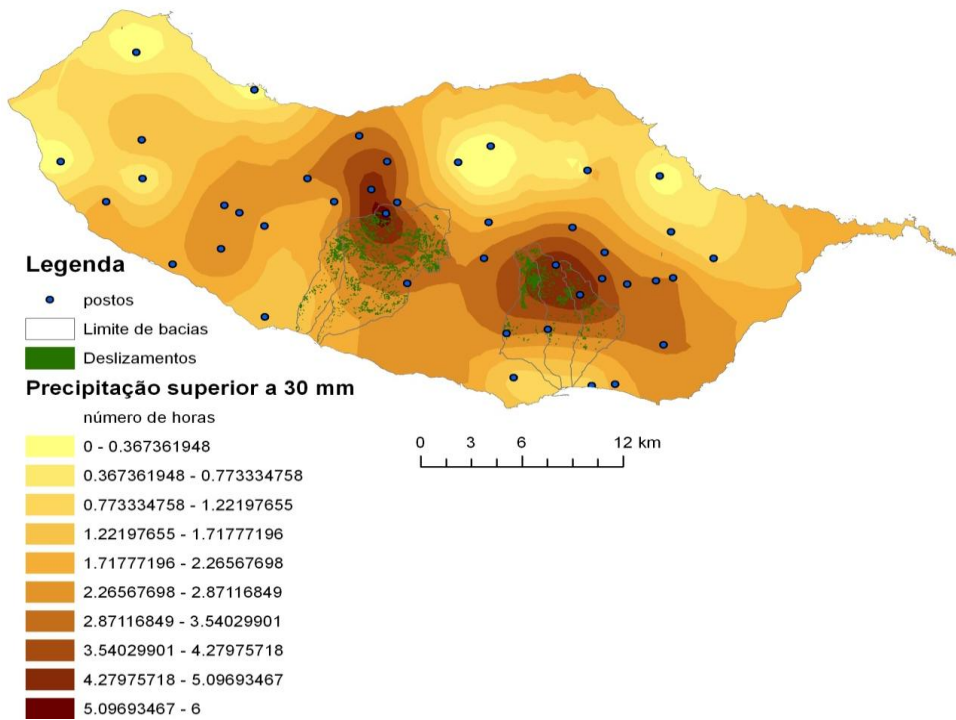


Figura 11 – Número de horas com precipitação superior a 30mm.

PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE MATERIAL SÓLIDO

As características geológicas e geomorfológicas das bacias hidrográficas e das respectivas ribeiras potenciam a ocorrência de fluxos muito significativos de materiais sólidos, os quais constituem o componente mais perigoso das aluviões. A Figura 12 ilustra a produção de sedimentos que ocorreu a 20/2/2010 nas bacias hidrográficas do concelho do Funchal e a sua descarga na baía do Funchal.

Esta produção de sedimentos é desencadeada pela acção da precipitação e da consequente ocorrência de escoamentos líquidos que mobilizam grandes quantidades de material sólido. A produção dos fluxos de material sólido resulta de diferentes processos, a saber: erosão distribuída nas vertentes, erosão em sulco e ravinamento, movimentos de terreno, e erosão fluvial nos fundos e margens dos leitos das ribeiras.

Estes processos correspondem ao encadeamento e sucessão temporal de mecanismos de erosão, transporte e deposição de sedimentos, em que a água é o principal agente mobilizador. Os sedimentos erodidos são transportados pelo escoamento sobre as vertentes ou na rede de drenagem, fluxos concentrados ou torrentes de escoamento bifásico (aluviões), com uma fase líquida (água) e uma fase sólida (detritos ou sedimentos) têm elevadas concentrações de material sólido com elevado potencial geomórfico.



Figura 12 - Vista da Baía do Funchal obtida a partir do satélite Geoeye-1, no dia 23 de Fevereiro de 2010.

EROSÃO DISTRIBUIDA

Entende-se por erosão (em sentido restrito) a desagregação e o transporte de material sólido - sedimentos – com origem nos solos e rochas da litosfera, para além de uma dada fronteira. A erosão espacialmente distribuída no espaço interfluvial, que não está associada a escoamentos concentrados, designa-se por erosão distribuída ou laminar, e por ser habitualmente quantificada em volume ou peso por unidade de área.

A erosão distribuída ou perda sedimentos nos solos e rochas do espaço interfluvial depende de múltiplos e variados factores e pode ser estimada pela Equação Universal da Perda de Solo - EUPS (Universal Soil Loss Equation - USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith em 1965, com as actualizações entretanto sugeridas em 1978 (Wischmeier, 1978) e outras adaptações introduzidas pelo formalismo da Equação Universal da Perda de Solo Revista- EUPSR

(Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE). Com base nesta metodologia foram estimados os valores de erosão, respectivamente, em período médio e para o dia 20 de Fevereiro:

- Em ano médio - $E \approx 45,0 \cdot \text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, ou $2600 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$.
- No dia 20 de Fevereiro de 2010 - $E \approx 65,0 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, ou $3750 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$.

A produção de sedimentos corresponde a uma parcela da erosão específica que atinge uma dada secção da rede de drenagem. O coeficiente de produção de sedimentos (C_{Ps}), a aplicar à erosão específica para a determinação da produção de sedimentos, foi estimado equação generalizada de Roehl, tendo-se obtido $C_{Ps} = 0,9$ para o período médio e $C_{Ps} = 1,0$ para o dia 20 de Fevereiro. Deste modo, para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal foram estimados os volumes de sedimentos produzidos, respectivamente, em período médio e para o dia 20 de Fevereiro, que se indicam seguidamente:

- Em ano médio - $V_s \approx 71\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$.
- No dia 20 de Fevereiro de 2010 - $V_s \approx 110\,000 \text{ m}^3$.

Importa salientar que, face à complexidade dos processos erosivos e aos erros e incertezas associados à quantificação de cada um dos seus parâmetros e factores, é necessário considerar um apreciável intervalo de confiança em torno das estimativas apresentadas. Na bibliografia são citados diversos intervalos de confiança, que se situam na generalidade dos casos entre, aproximadamente, ± 20 a 50% , mas que podem atingir valores mais elevados.

MOVIMENTOS DE VERTENTE

No âmbito do EARAM procedeu-se à inventariação e ao mapeamento dos deslizamentos de terras ocorridos nas vertentes das principais bacias dos concelhos do Funchal e da Ribeira Brava em 20 de Fevereiro e à avaliação do volume de material sólido produzido. Dada a dimensão da área em estudo, recorreu-se ao processamento digital de imagens de satélite de muito elevada resolução espacial e à sua conjugação com modelos geográficos do terreno e informação de campo, para assegurar a eficácia e rapidez do processo (Hapke, 2005; Danneals et al, 2007; Metternicht *et al.* 2005; van Westen *et al.* 2008). Como informação de base utilizaram-se:

- Imagens multiespectrais Geoeye-1 (R-G-B-NIR de 2 m/pixel de resolução espacial e PAN de 0.5 m/pixel de resolução espacial) recolhidas antes (21 e 29 de Julho de 2009) e após o acidente (23 e 28 de Fevereiro de 2010);
- Ortofotomapas com datas anteriores (2007) e posteriores ao acidente;
- Modelos digitais de terreno anteriores ao acidente obtidos por aerofotogrametria de voo de 2007 (resolução final de 10 m) e por tecnologia LIDAR (Light Detection And Ranging) de 2009 (resolução final de 4 m);
- Carta geológica (escala 1:80000) do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG, 2009);
- Carta de ocupação do solo Escala (escala 1:10000) de 2007 (COSRAM, 2007), com resolução de 0.25ha de área mínima cartográfica e com cinco níveis de classificação (compatível com os três níveis de classificação da CORINE Land Cover).

Esta informação de base foi complementada por trabalho de campo realizado pela equipa do EARAM, em colaboração com outras equipas do Governo Regional da Madeira (DR Florestas e DR de Informação Geográfica e Ordenamento do Território), o que permitiu a identificação no campo de vários deslizamentos ocorridos a 20 de Fevereiro e o seu levantamento topográfico.

A inventariação dos deslizamentos de vertente e cálculo dos volumes de material produzido iniciou-se com uma fase de pré-processamento que consistiu no co-registo, ortorrectificação e fusão das imagens. Ainda nesta fase de pré-processamento procedeu-se à avaliação das zonas com cobertura atmosférica (nuvens) ou pouco iluminadas (ensombradas), onde a classificação é extremamente difícil ou impossível.

A identificação dos deslizamentos foi efectuada com um método automático a partir da informação multi-espectral das imagens de satélite GeoEye-1. A abordagem escolhida recaiu no classificador de máxima verosimilhança, por ser o que apresentou os melhores desempenhos e de a sua aplicação não ser excessivamente complexa nem computacionalmente proibitiva. Este método permitiu, através dos descritores estatísticos de cada classe, classificar automaticamente cada um dos *pixéis* das imagens multi-espectrais, ou seja, permitiu que lhes fosse sempre atribuído uma das etiquetas (ou classes) seleccionadas previamente.

Na fase de treino, procedeu-se à definição prévia das classes de ocupação do solo existentes na região de estudo e à extracção de informação relativa às suas características espectrais nas imagens de satélite em pequenas zonas consideradas representativas de cada classe nas regiões de estudo. A fase de teste consistiu na classificação automática de toda a região de estudo, com base na informação espectral extraída e processada na fase de treino. Para este estudo foram definidas 12 classes de ocupação do solo.

À fase de classificação automática assistida seguiu-se o pós-processamento pericial dos resultados por inspecção visual. Cada polígono classificado como cicatriz de um deslizamento através do processo de classificação automática foi inspeccionado, editado e reclassificado pelo perito, por comparação com o observado nas imagens de detecção remota anteriores (ortofotomapas de 2007) e posteriores ao acidente (ortofotomapas de 2010).

Após o pré-processamento das imagens procedeu-se à avaliação das áreas ocultas das imagens quer devido à cobertura de nuvens quer por corresponderem a zonas de sombra. Infelizmente, as bacias com vertentes de declives mais acentuados são aquelas que apresentam uma maior proporção de áreas ensombradas, que no caso das bacias hidrográficas da Ribeira Brava atinge um valor próximo de 20% da área total. Nesta zona toda a imagem apresenta também alguma nebulosidade, facto que também condicionou fortemente os resultados da classificação.

Procedeu-se em seguida à fase de classificação das imagens com o objectivo de separar os deslizamentos originados no evento de 20 de Fevereiro com os resultados de eventos anteriores. A título ilustrativo, apresenta-se na Figura 13 o resultado da classificação numa zona das bacias do Funchal. Os polígonos a vermelho representam os limites de deslizamentos.

Após a fase de classificação a delimitação das cicatrizes dos deslizamentos foi validada por confrontação com os dados de campo recolhidos por técnicos da Direcção Regional das Florestas, pela equipa de geologia do projecto e pelos levantamentos topográficos realizados pela DRIGOT.

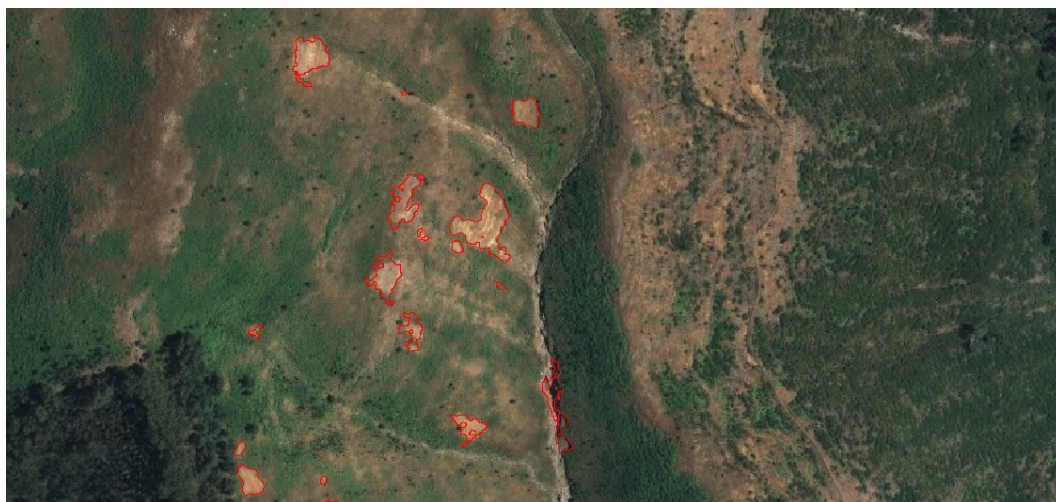


Figura 13 – Cartografia dos deslizamentos identificados numa zona do Funchal (Exemplo).

No Quadro 3 e no Quadro 4 apresentam-se os resultados de validação da classificação baseada no reconhecimento realizado pelos serviços florestais, que mostram um elevado grau de sucesso na identificação das cicatrizes. Os resultados para as bacias hidrográficas do Funchal são bons, com números de deslizamentos não identificados inferiores a 5%. Em rigor, os valores referidos nos quadros como sendo de deslizamentos identificados não devem ser entendidos na habitual acepção geológica do termo, mas como o número de polígonos identificados pelo procedimento de classificação das imagens de satélite. Um deslizamento é constituído por um ou mais polígonos.

Quadro 3 - Resultados da validação quantitativa do conjunto das bacias do Funchal

Bacias	Número total de deslizamentos identificados	Número total de amostras de campo	Deslizamentos visitados (%)	Deslizamentos correctamente classificados		Deslizamentos não identificados	
				Nº	%	Nº	%
João Gomes	708	21	3.0	20	95.2	1	4.8
Santa Lúzia	1039	29	2.8	28	96.6	1	3.4
São João	1544	73	4.7	70	95.9	3	4.1
Total	3291	123	3.7	118	95.9	5	4.1

Os resultados obtidos na Ribeira Brava são piores, principalmente no que respeita a deslizamentos não identificados, com proporções a variarem entre 13 e 20%. É de realçar no entanto que a amostra de validação é muito pequena.

Quadro 4 - Resultados da validação quantitativa do conjunto das bacias da Ribeira Brava

Bacias	Número total de deslizamentos identificados	Número total de amostras de campo	Deslizamentos visitados (%)	Deslizamentos correctamente classificados		Deslizamentos não identificados	
				Nº	%	Nº	%
Ribeira Brava	4583	95	2.1	76	80.0	19	20.0
Tabua	591	15	2.5	13	86.7	2	13.3
Total	5174	110	2.1	89	80.9	21	19.1

A avaliação dos volumes de material produzido pelos deslizamentos foi obtida pelo produto da área dos polígonos por uma espessura média estimada das cicatrizes, tendo-se assumido dois valores: 0.6 m e 1.5 m. Estes valores foram indicados como limites do intervalo de espessuras médias mais habituais em visitas de campo. Este intervalo é consistente com o das espessuras médias calculadas em 30 deslizamentos, onde foram realizados levantamentos topográficos. Optou-se por calcular os volumes de material produzido pelas cicatrizes das classes 1 e 3. Efectuou-se ainda outro cálculo, mais conservador, que inclui também a classe 2, constituída por cicatrizes antigas, que aparentam frequentemente ter sido reactivadas. Os resultados obtidos para as bacias do Funchal, apresentados no Quadro 5, evidenciam uma elevada incerteza nos volumes estimados, devido ao intervalo de espessuras utilizado e à inclusão da classe 2.

Quadro 5 – Volumes produzidos nas bacias do Funchal

Classes	Área (m ²)	Vol. Min (m ³) (Área*0,6 m)	Vol. Max (m ³) (Área*1,5m)
Classe 1	151.661	90.997	227.492
Classe 2	108.300	64.980	162.450
Classe 3	100.946	60.568	151.419
Total	360.907	216.544	541.361

Uma parte significativa do volume sólido transportado pelas ribeiras do concelho do Funchal deposita-se na parte terminal das mesmas e nas ruas do centro da cidade. A outra parte, incluindo a fracção muito fina de sedimentos, foi transportada para o oceano. De acordo com os dados recolhidos, o volume do material sólido depositado na cidade na sequência do evento de 20/2/2010 e transportado nas acções de limpeza para um aterro criado para o efeito tem o valor de cerca de 140.000 m³. A juntar a este volume pode ainda considerar-se cerca de 100.000 m³ de volume dragado na zona portuária. Mesmo considerando que alguns detritos removidos tenham sido transportados para outro local, admite-se que um volume total não inferior a 250.000 m³ de material sólido tenha sido depositado na zona da cidade do Funchal, sem contar com o volume de material fino que foi transportado em suspensão pelas correntes marítimas: a respectiva pluma é bem visível em fotografias satélite (Figura 12). Uma estimativa muito sumária, com base em dados de campo e análise de fotografias, do volume total de

material sólido depositado nas áreas marginais das ribeiras na área do Funchal e nos respectivos leitos, efectuada pelos alunos da UMa aponta para um valor de 530.000 m³. A cartografia dos deslizamentos que ocorreram a 20 e Fevereiro foi depois cruzada com as cartas representativas de alguns factores potencialmente condicionantes, nomeadamente cartas de precipitação, carta de solos, carta de ocupação do solo (COS2007), carta de declives e carta de vias de comunicação. Os resultados indiciam que, de um modo geral, a maioria dos deslizamentos ocorrem em áreas cujo coberto vegetal é total ou parcialmente desprovido de árvores e onde os declives se encontram entre 25° e 40° (nas bacias do Funchal) ou entre os 30° e 45° (nas bacias da Ribeira Brava). Existem também uma correlação entre a área afectada por deslizamentos e a área onde ocorreram precipitações superiores a 30 mm num período superior a 3 horas.

ESCOAMENTOS LÍQUIDOS

O EARAM procurou também estimar o caudal de ponta de cheia que ocorreu em 20 de Fevereiro de 2010 em várias secções das bacias hidrográficas em estudo. O tempo de concentração de cada uma destas secções foi estimado com base no comprimento do percurso de escoamento do limite da bacia hidrográfica até a cada secção, assumindo-se diferentes valores da velocidade de escoamento consoante a dimensão do curso de água. Tendo em conta os resultados da simulação hidráulica optou-se por adoptar os valores que assumem uma velocidade escoamento média nos principais cursos de água igual a 4 m/s e uma velocidade de escoamento média ao longo das encostas e nos cursos de água de menor dimensão de 1 m/s, o que conduziu a estimativas do tempo de concentração entre 1,1 horas para a bacia hidrográfica da ribeira de S.João e 1,4 horas para a bacia hidrográfica da Ribeira Brava.

A partir dos valores do tempo de concentração e das superfícies de precipitação estimadas para diferentes intervalos de tempo foi possível estimar os valores máximos de caudal líquido que ocorreram durante o evento de 20/2/2010 em diversas secções das ribeiras em estudo.

O evento de 20/2/2010 ocorreu na sequência de um inverno muito húmido e de um mês de Fevereiro em que a precipitação foi significativa e persistente no tempo. Pode-se assim assumir que durante o evento de 20/2/2010 o solo se encontrava completamente saturado, e consequentemente com uma muito reduzida capacidade de infiltração. Nestas circunstâncias, o valor do caudal de ponta em cada secção pode ser estimado pelo produto da área da bacia hidrográfica com o valor da intensidade máxima de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração. Obtiveram-se estimativas valores de caudal de ponta de cheia nas secções finais entre 130 e 660 m³/s (Quadro 6).

Quadro 6 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções terminais das diferentes ribeiras

Bacia hidrográfica	Área da bacia hidrográfica (km ²)	Distância ao início da rede hidrográfica de 1 km (m)	Distância à cabeceira (m)	Tempo de concentração (h)	Intensidade de precipitação (mm/h)	Caudal de ponta (m ³ /s)
João Gomes	11,4	9768	11448	1,1	74	234
Santa Lúzia	15,6	10887	12306	1,2	70	303
S. João	14,7	10928	12141	1,1	75	305
Ribeira Brava	40,9	12806	14468	1,4	58	663
Tabua	8,8	6589	9539	1,3	53	130

SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DOS ALUVIÕES

A modelação computacional dos escoamentos bifásicos está ainda numa fase pioneira, não obstante o acervo de conhecimentos técnicos e empíricos sobre “torrentes” de tipo semelhante aos da Madeira ser já relevante.

No EARAM simulou-se o escoamento da mistura de água e material granular (a aluvião) em condições idealizadas, mas próximas das que ocorreram na Ribeira de São João na madrugada e manhã do dia 20 de Fevereiro de 2010 para procurar caracterizar o aluvião e identificar as zonas em que se regista maior tendência para a deposição generalizada.

Os resultados da simulação mostram uma frente de onda abrupta, típica de escoamentos de detritos plenamente desenvolvidos, que se propaga para jusante com uma velocidade média de 2,6 m/s. A partir de $x = 3000$ m, o caudal líquido associado à frente de onda deste escoamento assume um regime estratificado (“*sheet flow*”) em que a fase líquida é um escoamento de lamas turbulento.

Verifica-se que há zonas do troço modelado que, consistentemente, estão sujeitas a deposição generalizada e zonas predominantemente sujeitas a erosão. Em geral, o trecho a montante do Funchal está sujeito a erosão generalizada antes e durante o período em que os caudais são máximos. Nos trechos regularizados a jusante de $x = 7000$ m verifica-se haver zonas de deposição generalizada. A deposição ocorre devido à existência de estreitamentos que, em regime rápido, forçam o aumento local da altura do escoamento, diminuição da velocidade e consequente perda da capacidade de transporte sólido. O material sólido tende a acumular-se localmente e a montante do estreitamento. Na ausência destas singularidades de traçado, a tendência neste trecho seria erosional, justificada pelos declives elevados.

SINTESE DOS RESULTADOS

O Quadro 7 apresenta uma síntese das estimativas de volumes de material sólido.

Quadro 7 – Síntese das estimativas de volumes de material sólido

Estimativas para o evento de 20/2/2010	Ribeira de João Gomes	Ribeira de Santa Lúzia	Ribeira de São João	Ribeira Brava	Ribeira da Tabua
Área da bacia (km ²)	11,4	15,6	14,7	40,9	8,8
Caudal líquido de ponta na foz (m ³ /s)	234	303	305	663	130
Área dos deslizamentos (m ²)	59.310	91.408	210.189	581.635	105.653
Volume proveniente de deslizamentos de vertente (m ³)	De 35.587 a 88.967	De 54.847 a 137.113	De 126.112 a 315.284	De 349.982 a 872.472	De 63.694 a 158.479
Volume proveniente da erosão distribuída (m ³)	110.000			Não avaliado	Não avaliado
Balanço do volume erodido do leito da ribeira (m ³)	Não avaliado	Não avaliado	20.000	Não avaliado	Não avaliado

PRINCIPIOS ORIENTADORES DE PROTECÇÃO CONTRA OS ALUVIÕES

Em resultado dos trabalhos efectuados e da análise das condições específicas que envolvem o risco de ocorrência de aluviões na ilha da Madeira, o EARAM propôs um conjunto de princípios orientadores dos projectos de implementação de medidas de protecção, agrupados e caracterizados em seis tipos de acção.

Retenção de material sólido

A diminuição do volume total de material sólido disponível para ser transportado pelo escoamento pode ser alcançada através de intervenções nas áreas das cabeceiras, nas encostas e nos leitos de ribeiras, envolvendo medidas como:

- a promoção de um coberto vegetal adequado;
- a implementação de sistemas de drenagem eficazes, em zonas críticas de encostas, de forma a evitar concentrações locais de escoamentos superficiais, propiciadoras de ravinamentos ou de movimentos de massa,
- a modelação do terreno para estabilização preventiva de encostas ou a manutenção activa de zonas com terraços já existentes;
- a consolidação de trechos dos leitos das ribeiras com maior declive (zonas de montante) e com maior susceptibilidade de produção significativa de fluxos de material sólido, através da estabilização do leito por estruturas transversais (diques ou degraus) e da protecção localizada de depósitos marginais por estruturas longitudinais;
- o controlo de aterros atendendo que estes podem constituir, com relativa facilidade, fontes de material sólido mobilizáveis.

Controlo do transporte de material sólido

A interceptação e a retenção do maior volume possível de material sólido em movimento a montante de zonas com ocupação humana reduzem o risco associado aos aluviões e atenuam a gravidade do impacto destes escoamentos. A criação de condições de escoamento que promovam a interceptação e a deposição de materiais sólidos em locais adequados exige uma análise de conjunto do funcionamento de toda a rede hidrográfica e a manutenção de secções transversais e de declives que propiciem condições de escoamento e de transporte sólido adequados aos objectivos estabelecidos para cada trecho da ribeira.

A implementação de sistemas ou estruturas transversais de interceptação e retenção temporária de material sólido com maiores dimensões é uma das possíveis intervenções. Estas infra-estruturas asseguram a passagem do escoamento líquido e de sólidos com menor dimensão, mas retêm os blocos com maior potencialidade destrutiva. Em ravinas ou linhas de água secundárias com uma pequena bacia hidrográfica e com um pequeno volume potencial de material a reter podem ser utilizadas estruturas "leves", do tipo "rede". As estruturas de maior porte, do tipo barragem, devem ser localizadas em secções estratégicas das ribeiras com dimensões maiores, de forma a constituírem barreiras eficazes na atenuação, para jusante, da perigosidade (poder destrutivo) dos escoamentos de grande intensidade. Para manter a eficácia de protecção deste tipo de estruturas torna-se necessário garantir que o material retido é removido para que a capacidade de retenção se mantenha disponível, o que exige a existência de condições de acesso aos locais de implantação destas infra-estruturas e de sustentabilidade económica da exploração respectiva.

Atenuação da vulnerabilidade das áreas expostas

A atenuação da vulnerabilidade das áreas expostas ao risco exige a implementação de um conjunto integrado de medidas, que incluem a deslocação de infra-estruturas e outros bens, a sua protecção directa ou a transferência do risco através de seguros adequados, quando tal se justifique e seja possível. As medidas de mitigação dos potenciais danos ou das consequências das aluviões dependem das características das áreas e do tipo de ocupação de solo.

Nas zonas urbanas, comerciais e industriais localizadas junto aos trechos terminais e canalizados das ribeiras, e dessa forma directamente expostas ao perigo das aluviões, é necessário assegurar condições de vazão nas secções críticas desses trechos. Para isso pode ser preciso alterar a configuração das ribeiras para remover as obstruções aos fluxos líquidos e sólidos e construir estruturas longitudinais (muros), dimensionadas de forma a conterem escoamentos excepcionais de referência.

A protecção e o controlo da vulnerabilidade de bens isolados (habitações ou instalações relativamente dispersas) podem ser conseguidos pela remoção dos bens em zona com risco de inundação, pelo desvio das aluviões ou pela melhoria local das respectivas condições de escoamento. A protecção directa dos bens por muros de protecção ou estruturas de retenção "leves" só deve ser realizada, caso se justifique a permanência dessa exposição ao risco.

As habitações isoladas ou conjuntos de habitações construídos em encostas com um elevado perigo de movimentos de massa, que podem ser desencadeados por eventos de precipitação e escoamento superficial, devem ser removidas caso de encontrem em condições de risco intoleráveis. Não obstante estas situações poderem estar associadas a fenómenos hidrológicos, o respectivo risco é, predominantemente, geotécnico pois pode não resultar de um impacto directo de escoamentos em ravinas ou em ribeiras. Nos casos em que se justifique as medidas de defesa ou protecção prioritárias incluem a consolidação ou estabilização de taludes, a implementação de sistemas de drenagem eficazes e a promoção de um coberto vegetal adequado.

As vias de comunicação rodoviárias são infra-estruturas particularmente vulneráveis às aluviões quando os respectivos traçados interceptam sucessivas linhas de água secundárias (ravinas) e se desenvolvem ao longo de encostas ou taludes com elevada susceptibilidade de movimentos de massa. Nos atravessamentos ou na ocupação de zonas marginais críticas de ribeiras, a cota da rasante da via rodoviária deve ser fixada tendo em conta as cotas máximas previsíveis dos escoamentos de referência e as secções hidráulicas de passagem sob as vias devem ter uma capacidade de vazão adequada, tendo em conta as características específicas dos escoamentos mistos, líquidos e sólidos. As vias rodoviárias construídas em aterro ao longo de zonas marginais críticas deverão ter os taludes protegidos tendo em conta a capacidade erosiva do escoamento para a situação de referência, podendo-se justificar em trechos localizados a adopção de uma solução estrutural em pilares, em substituição de aterros, de forma a evitar o risco de erosão, a atenuar a perturbação no escoamento e a eliminar obstruções nas passagens hidráulicas. Se os pilares forem fundados em aluvião ou coluvião,

deverão ser estudadas medidas de protecção contra erosões localizadas. Em trechos com maior risco de deslizamento nos taludes marginais devem ser previstas barreiras de retenção ou de desvio, localizadas ou contínuas.

Controlo da exposição ao risco

O controlo da exposição aos riscos pressupõe o conhecimento da distribuição espacial das vulnerabilidades associadas ao risco de aluviões para identificação dos locais adequados para a ocupação humana e para a localização de actividades económicas, sociais ou culturais. A elaboração e aplicação de cartas de zonamentos da vulnerabilidade e do risco, em particular nas áreas em desenvolvimento ou de expansão urbanística, permite indicar o grau de exposição às diferentes fontes de perigo (e.g. instabilidade de vertentes ou inundações) e orientar o tipo de ocupação do território de acordo com critérios adequados. Estas cartas devem preconizar a interdição total de construção de habitações em determinadas zonas críticas e a deslocação de infra-estruturas e bens sensíveis que violem os critérios acima referidos e que não possam ser protegidas a um custo razoável.

Previsão e aviso – Sistema estruturado de previsão

A existência de sistemas de previsão e de alerta precoce permite a mobilização antecipada dos agentes da protecção civil e o aviso à população no caso de se justificar. No entanto, as características específicas das bacias hidrográficas na ilha da Madeira condicionam a eficácia destes sistemas, sobretudo porque os tempos de concentração e de resposta hidráulica relativamente pequenos (da ordem de uma hora) dificultam uma reacção eficaz e em tempo útil, no caso de cheias com elevada perigosidade resultantes de eventos meteorológicos significativos. A incerteza no processo de desencadeamento ou formação de aluviões intensos e na previsão da distribuição espacial do fenómeno pelas bacias da ilha pode também deteriorar a fiabilidade do sistema e pôr em causa a respectiva eficácia. A utilização de novas tecnologias ou de equipamento avançado de detecção precoce, em paralelo com a recolha, análise e interpretação continuada e consistente de dados relativos aos parâmetros intervenientes no processo pode contribuir para a calibração eficaz do referido sistema.

Formação e informação ao público

Finalmente, é importante realçar que a protecção de pessoas e bens materiais contra os efeitos de aluviões deve ser uma responsabilidade de todos, em especial os cidadãos que estão expostos aos riscos do fenómeno. Esta partilha das responsabilidades exige a compreensão e o domínio dos processos associados à ocorrência de aluviões e à respectiva prevenção, o que pode ser conseguido com uma formação básica que abranja os diferentes níveis ou escalões do ensino. Os instrumentos de planeamento, nomeadamente os que suportam decisões relativamente à ocupação de áreas ou locais com elevado risco, devem constituir fontes de informação e de divulgação eficazes que proporcionem aos cidadãos um esclarecimento tanto quanto possível convincente do nível de perigo associado. A afixação de painéis ou cartazes a colocar em áreas mais perigosas poderá complementar esse tipo de informação. Uma melhor formação e informação possibilitarão uma participação pública mais eficaz em decisões, nomeadamente na interiorização dos níveis de toleráveis dos riscos e da segurança.

CONCLUSÕES

O Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira contribuiu para o aprofundamento do conhecimento técnico e científico dos processos de desenvolvimento do fenómeno designado por aluviões. O estudo efectuado evidencia e confirma a elevada susceptibilidade da ilha da Madeira à ocorrência deste tipo de fenómeno, a complexidade dos processos que lhe estão associados e os factores adversos, naturais e sociais, que condicionam a gestão deste risco público.

O estudo propõe um conjunto diverso de medidas e de instrumentos, nomeadamente medidas estruturais que visam a atenuação da produção e a retenção significativa, a montante de zonas sensíveis ou vulneráveis, da fracção mais perigosa do material sólido das enxurradas, de uma forma economicamente sustentável. Propõe também, medidas não estruturais que incluem instrumentos de apoio ao planeamento e ordenamento do território para controlar a ocupação e a exposição de pessoas e bens às aluviões (cartas de zonamento dos riscos), e acções de formação e de informação do público que melhoram a percepção do risco e a participação do público, como parte interessada nos processos de decisão envolvendo o risco e a protecção contra aluviões.

Uma aposta séria nas acções de monitorização e de investigação deste tipo de fenómenos, poderá a prazo contribuir para melhoria significativa da capacidade de previsão e alerta precoce deste tipo de fenómenos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Danneels G, Pirard, E & Havenith, H-B (2007) - Automatic landslide detection from remote sensing images using supervised classification methods. In: *2007 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM*, 3014-3017.

Hapke C.J. (2005) - Estimation of regional material yield from coastal landslides based on historical digital terrain modeling. *Earth Surf. Process. Landforms* **30**: 679–697

LNEC (1994). Estudo hidrológico e hidráulico da ribeira dos Socorridos. Estudo encomendado pela Empresa de Electricidade da Madeira. Lisboa.

LNEG (2009). Carta geológica simplificada da Ilha da Madeira à escala 1:80.000. Coordenação de M. Luísa Ribeiro. Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Direcção Regional do Comércio, Indústria e Energia. Projecto co-financiado pela Região Autónoma da Madeira.

Lopes S.S. (2003) O Risco de Aluvião nas Bacias Hidrográficas do Funchal. Relatório do Seminário da licenciatura em Geografia Física e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa.

Lopes S.S., Aguiar N (2009a) Caracterização e monitorização da bacia hidrográfica da Madalena. Relatório Técnico DHTE 02, Laboratório Regional de Engenharia Civil.

Lopes S.S., Aguiar, N (2009b) Caracterização e monitorização da bacia hidrográfica de São Vicente. Relatório Técnico DHTE 03, Laboratório Regional de Engenharia Civil.

Metternicht, G., Hurni, L., Gogu, R. (2005): "Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 98, No. 2-3, Págs 284-303.

Quintal, R. (1999) – "*Aluviões da Madeira. Séculos XIX e XX*". *Territorium. Revista de Geografia Física aplicada ao Ordenamento do Território e Gestão de Riscos Naturais*. N.º 6, p. 31-48. Minerva. Coimbra.

Ribeiro, O. (1985) - *A Ilha da Madeira até Meados do século XX. Estudo Geográfico*. Instituto de Cultura e Língua Portuguesa. Lisboa.

SRA/INAG (2003), Plano Regional de Água da Madeira, Secretaria Regional do Ambiente/Instituto da Água, Funchal.

SRES (2010) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Relatório Base, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

SRES (2010a) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo A – Caracterização das precipitações intensas;

SRES (2010b) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo B – O papel do coberto vegetal, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

SRES (2010c) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo C – Cartografia dos deslizamentos, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

SRES (2010d) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo D – Caracterização geotécnica, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

SRES (2010e) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo E - Avaliação da erosão distribuída pela aplicação da Equação Universal de Perda de Solos, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

SRES (2010f) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo F – Escoamentos mistos ou bifásicos, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

SRES (2010g) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo G – Levantamento de dados de campo da ribeira João Gomes, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

SRES (2010h) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo H – Levantamento de dados de campo da ribeira de Santa Lúzia, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

SRES (2010i) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo I – Levantamento de dados de campo da ribeira de São João, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

SRES (2010j) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo J – Levantamento de dados de campo da ribeira Brava, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

SRES (2010k) Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Anexo K – Levantamento de dados de campo da ribeira da Tabua, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Funchal.

Wischmeier, W.H.; SMITH, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: United States Department of Agriculture.