

Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira - Fase 2

F7 – Relatório final

Dezembro de 2017



Relatório final

Ficha do documento	
Projeto	Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira - Fase 2
Coordenação	António Betâmio da Almeida (IST), Rodrigo Proença de Oliveira (IST), Paulo França (UMa)
Cliente	Governo Regional da Madeira / Direcção-Regional de Infra-estruturas e equipamentos
Documento	F7: Relatório final
Autores	Rodrigo Proença de Oliveira, António Betâmio de Almeida, António Jorge Sousa, Gloria Franco, Maria João Pereira, Miguel Azevedo Coutinho, Rui Ferreira
Data	Dezembro de 2017
Versão	Versão para divulgação pública



Índice de texto

Índice de texto	iii
Índice de figuras	v
Índice de quadros	viii
1 Enquadramento e objectivos.....	11
2 Caracterização geral do fenómeno das aluviões	14
2.1 Características e complexidade do fenómeno	14
2.2 Antecedentes da ilha da Madeira.....	20
3 Estimativas de precipitação e de caudal líquido.....	24
4 Perigosidade de deslizamentos	33
4.1 Introdução	33
4.2 Informação utilizada	34
4.3 Análise de imagens de deteção remota para inventariação rápida e automática dos deslizamentos ocorridos.....	34
4.4 Estimativas de volumes de deslizamentos associados aos eventos estudados.....	40
4.5 Mapas de perigosidade de deslizamento para a Madeira	42
4.6 Limiares de intensidade e duração da precipitação	49
4.7 Incerteza na modelação.....	55
5 Erosão específica	58
5.1 Tipos de erosão hídrica.....	58
5.2 Metodologia de análise	59
5.3 Principais resultados.....	64
6 Utilização de ferramentas de simulação matemática para a análise de risco de aluviões.....	68
6.1 Enquadramento e objetivos	68
6.2 Ferramenta de modelação matemática: modelo STAV2D	69
6.3 Metodologia para Avaliação da severidade de aluviões nas bacias hidrográficas do Funchal e Machico.....	71
6.4 Síntese e conclusões.....	84

7	Gestão de risco	87
7.1	Enquadramento e caracterização do risco de aluviões	87
7.2	Princípios orientadores de proteção contra aluviões	89
7.3	Medidas de prevenção e de proteção estudadas no EARAM	90
8	Aplicação da Diretiva das Inundações à Ilha da Madeira	111
8.1	Enquadramento	111
8.2	Aspetos principais a ter em conta	112
8.3	Contribuições do EARAM para a aplicação do Decreto-Lei nº 115/2010	113
9	Sistema de previsão e alerta de aluviões	116
10	Condicionalismos sociais	121
10.1	Aspetos gerais	121
10.2	Enquadramento teórico	121
10.3	Estudo empírico.....	122
10.4	Resultados	125
10.5	6 Síntese e sugestões futuras.....	130
11	Síntese e recomendações	134
12	Referencias	136
13	Anexo 1 – Lista de aluviões ocorridos até 2013	141
14	Anexo 2 - Lista de notas técnicas produzidas	148

Índice de figuras

Figura 1 - Deposição de material sólido junto à Ribeira de João Gomes (Funchal).....	15
Figura 2 - Ocupação por detritos do trecho canalizado da Ribeira de Santa Luzia (Funchal).....	16
Figura 3 - Material sólido depositado no leito da Ribeira de São João (Funchal).....	16
Figura 4 - Moradias e estrada danificadas pela aluvião (Meia Léguas).....	17
Figura 5 - Análise multitemporal da mesma região em imagens de: (a) 2009: sem deslizamentos; (b) 2010: com deslizamentos criados durante o evento de 20-fev-2010 e (c) 2011: regeneração da vegetação com identificação dos deslizamentos de 2010.....	37
Figura 6 - Localização da zona de teste a norte da cidade do Funchal com indicação dos deslizamentos de referência (a vermelho).....	38
Figura 7 – Fluxograma global dos procedimentos de processamento das imagens de deteção remota e de informação adicional (se existente), desde o seu pré-processamento até à extração dos deslizamentos	39
Figura 8 - Levantamento das cicatrizes de deslizamento para a Ribeira Brava e o Funchal	42
Figura 9 - Cicatrizes em forma de polígonos (esquerda) e cicatrizes na base da malha quadrada (célula activa: vermelho; célula não activa: branco) (direita).....	43
Figura 10: Mapa de precipitação acumulada entre 2001 e 2009 (resolução 40 por 40 metros).....	44
Figura 11: Mapa de declive mínimo (resolução 40 por 40 metros).....	45
Figura 12: Mapa de declive médio (resolução 40 por 40 metros).....	45
Figura 13: Mapa de ocupação do solo (COS2007, 5 níveis) (resolução 40 por 40 metros).....	46
Figura 14: Mapa de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa (resolução 40 por 40 metros).....	46
Figura 15: Mapa de suscetibilidade binário com sobreposição das cicatrizes de 2010 (células a preto) para a região da Ribeira Brava e Funchal. Vermelho: células suscetíveis a deslizamentos (probabilidade superior a 0.42). Cinzento: células não suscetíveis a deslizamentos (probabilidade inferior a 0.42).....	47
Figura 16 - Mapa de suscetibilidade binário com sobreposição das cicatrizes de 2011 (células a preto). Vermelho: células suscetíveis a deslizamentos (probabilidade superior a 0.42). Cinzento: células não suscetíveis a deslizamentos (probabilidade inferior a 0.42).....	48

Figura 17 - Gráfico de intensidade e duração de eventos (precipitação horária superior a 8mm) e divisão por cores das 4 classes.	50
Figura 18: Mapa de classes de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa para as zonas da Ribeira Brava e Funchal (resolução 40 por 40 metros).	51
Figura 19: Mapa da precipitação média horária para as zonas da Ribeira Brava e Funchal, estimada por krigagem ordinária, para o período de duração do evento que se iniciou em 20 de Fevereiro de 2010.	52
Figura 20: Mapa de classes de intensidade-duração de precipitação para as zonas da Ribeira Brava e Funchal, definidas para o período de duração do evento que se iniciou em 20 de Fevereiro de 2010.	52
Figura 21: Esquema da metodologia desenvolvida para a definição do nível de aviso.	53
Figura 22: Níveis de aviso definidos para as condições de precipitação do evento de 20 de Fevereiro de 2010 na região da Ribeira Brava e Funchal.	55
Figura 23 - Mapa da variância obtido das cem simulações da variável precipitação acumulada entre 2001-2009.	56
Figura 24 - Mapa de variância obtido dos cem modelos de suscetibilidade.	57
Figura 25 - Pormenor da localização das bacias hidrográficas objeto de estudo e da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos.	59
Figura 26 - Distribuição espacial das estações de monitorização existentes na Madeira.	60
Figura 27 a) Hietograma da precipitação (Wischmeier) para o dia 20 de Fevereiro; b) Histograma da erosividade da precipitação (Wischmeier) para o dia 20 de Fevereiro.	62
Figura 28 - Carta da erosão hídrica (E) para a ilha da Madeira.	66
Figura 29 - Ameaça de erosão hídrica na ilha da Madeira	67
Figura 30 – Padrão final de erosão/deposição. Parâmetros: $D_{50}=2.0\text{mm}$, $C_{f_{\max}}=0.07$ (Ferreira et al., 2009).	70
Figura 31 - Hidrograma, Ribeira de São João. Caudal Cenário 1, caudais total e sólido Cenário 2 e intensidade média da precipitação na bacia.	73
Figura 32- Hidrograma, Ribeira de Sta. Luzia. Caudal Cenário 1, caudais total e sólido Cenário 2 e intensidade média da precipitação na bacia.	74
Figura 33- Hidrograma, Ribeira de João Gomes. Caudal Cenário 1, caudais total e sólido Cenário 2 e intensidade média da precipitação na bacia.	74

Figura 34 - Critério de arrastamento. Probabilidade de arrastamento de uma pessoa em boas condições físicas. Esquerda: simulação de água limpa (Cenário 1). Direita: simulação da aluvião (Cenário 2)	75
Figura 35 – Comparação da extensão máxima da inundação calculada neste estudo e a extensão da inundação correspondente ao estudo Municipia (2016). Bacia hidrográfica da Ribeira de São João.....	77
Figura 36 – Comparação da extensão máxima da inundação calculada neste estudo e a extensão da inundação correspondente ao estudo Municipia (2016). Bacia hidrográfica da Ribeira de Santa Luzia.....	78
Figura 37 – Comparação da extensão máxima da inundação calculada neste estudo e a extensão da inundação correspondente ao estudo Municipia (2016). Bacia hidrográfica da Ribeira de João Gomes	79
Figura 38 - Hietograma eficaz e hidrograma na secção da foz, Ribeira do Machico	81
Figura 39 - Critério de arrastamento. Probabilidade de arrastamento de uma pessoa média.....	81
Figura 40 – Comparação da extensão máxima da inundação calculada neste estudo e a extensão da inundação correspondente ao estudo Municipia (2016). Bacia hidrográfica da ribeira do Machico.....	83
Figura 41 - Exemplo de medida estrutural. Antecipação computacional de uma estrutura de retenção de material sólido (empresa LCW).....	95
Figura 42 - Exemplo de medida estrutural. Estrutura de retenção construída na ribeira de Santa Luzia (2013).	95
Figura 43 - Ribeira de S. João. Exemplo de intervenção após o evento de 20 de fevereiro de 2010.	99
Figura 44 – Esquema tipo de instalação de sensores numa estrutura de retenção de material sólido (Aqualogus, 2014).....	108
Figura 45 – Proposta de arquitetura do sistema de previsão e alerta de aluviões.....	119

Índice de quadros

Quadro 1 - Síntese histórica das principais aluviões da ilha da Madeira.....	21
Quadro 2: Bacias hidrográficas incluídas nos sistema de modelação hidrológica.....	26
Quadro 3: Estimativas dos valores máximos anuais da precipitação em 6 horas, obtidos pelo método de interpolação espacial de krigging (mm).....	28
Quadro 4: Estimativas de caudal de ponta de cheia.....	29
Quadro 5 - Lista de imagens na base de dados de imagens de satélite de muita elevada resolução espacial da ilha da Madeira.	36
Quadro 6 - Fatores condicionantes candidatos.	43
Quadro 7 - Células corretamente classificadas (células ativas – suscetíveis, células não ativas – não suscetíveis) e incorretamente classificadas (células ativas – não suscetíveis, células não ativas – suscetíveis) para as zonas da Ribeira Brava e Funchal (2008 e 2010) e ilha da Madeira (2011).	48
Quadro 8 - Número de células com presença/ausência de movimentos de massa por classe de intensidade e duração de precipitação.....	49
Quadro 9: Matriz de níveis de aviso à ocorrência de movimentos de massa.....	54
Quadro 10: Frequência de células ativas (com deslizamentos) e não ativas (sem deslizamentos) distribuídas pelos níveis de aviso definidos para o evento de 20 de Fevereiro de 2010.....	55
Quadro 11 – Volumes de material sólido acumulados nas bacias hidrográficas das ribeiras afluentes ao Funchal, incluindo na baixa do Funchal	70
Quadro 12 - Caudais de ponta de cheia, ribeiras do Funchal	72
Quadro 13 – Comparação de caudais de ponta de cheia, ribeiras do Funchal.....	75
Quadro 14 – Principais diferenças quanto às metodologias de cálculo do estudo Municipia (2016) e do presente estudo, Cenário 2.....	76
Quadro 15 – Comparação de caudais de ponta de cheia, ribeiras do Funchal.....	84
Quadro 16 - Avaliação da classificação automática com a metodologia desenvolvida.	102
Quadro 17 - Caraterização breve das freguesias selecionadas para o estudo	123
Quadro 18 - Média e desvio-padrão –Perceção de risco de perigos naturais à escala regional e local.....	125
Quadro 19 - Média e desvio-padrão – Probabilidade da residência ser destruída por uma aluvião	125

Quadro 20 - Média e desvio-padrão - Perceção de risco de aluvião126



1 Enquadramento e objetivos

Este documento é o relatório final da 2ª fase do Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira (EARAM2), um projeto desenvolvido para o Governo Regional da Madeira por um consórcio constituído pelo Instituto Superior Técnico (IST), pela Associação para o Desenvolvimento do IST (ADIST) e pela Universidade da Madeira (UMa).

O EARAM2 vem na sequência da 1ª fase do Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira, lançado pela Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira (SRES) após o acontecimento hidrológico ocorrido em 20 de fevereiro de 2010. Os trabalhos da referida 1ª Fase decorreram entre 1 de maio e 31 de dezembro de 2010 e tiveram os seguintes objetivos gerais:

- Caracterização fenomenológica do evento de 20 de fevereiro;
- Avaliação dos riscos associados às aluviões na Ilha da Madeira;
- Estabelecimento de princípios gerais de orientação das intervenções de prevenção e proteção.

O âmbito geográfico desta 1ª fase compreendeu a área abrangida pelas bacias hidrográficas mais afetadas pelo evento de 20 de fevereiro de 2010: as bacias das ribeiras de João Gomes, Santa Luzia e São João, do Concelho do Funchal, e as bacias das ribeiras da Ribeira Brava e Tabua, do Concelho da Ribeira Brava.

A descrição dos estudos efetuados, as principais conclusões obtidas e os princípios orientadores propostos foram apresentados no Relatório Final (dezembro de 2010), no Relatório-Síntese (novembro de 2010) e no relatório com os Princípios Orientadores (agosto de 2010).

O EARAM2 complementou os trabalhos da 1ª fase do projeto, com os seguintes objetivos estratégicos:

- Aprofundar o conhecimento sobre o fenómeno das aluviões;
- Melhorar a metodologia para avaliação do risco e contribuir para a implementação da Diretiva europeia relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações (Diretiva 2007/60/CE) à Região Autónoma da Madeira;
- Estender a avaliação do risco a toda a ilha da Madeira;
- Conceber o sistema de previsão e aviso de aluviões;
- Avaliar os condicionalismos sociais na prevenção do risco de aluviões;
- Aprofundar a capacidade técnica ao nível regional para lidar com este tipo de risco.

Nesse sentido, foram desenvolvidos vários trabalhos que concorrem para os objetivos identificados e que contribuem para uma gestão integrada do risco de aluviões na ilha da Madeira. Conforme proposto nos relatórios da fase 1 do EARAM, essa gestão integrada do risco deve ser suportada por medidas estruturais (e.g. gestão do coberto vegetal, controlo do transporte do material sólido e proteção das áreas vulneráveis) e por medidas não estruturais (e.g. controlo da exposição ao risco, sensibilização da população, monitorização do fenómeno, previsão e alerta das aluviões). Os trabalhos desenvolvidos nesta segunda fase privilegiaram as intervenções não estruturais, nomeadamente as áreas da avaliação do risco, de controlo da exposição a esse risco e de desenvolvimento de metodologias e ferramentas que possam vir a ser integradas num futuro sistema de previsão e alerta das aluviões.

No âmbito desta fase do projeto foram elaboradas várias Notas Técnicas que descrevem os trabalhos desenvolvidos e os resultados alcançados (Anexo 2). Este relatório final sintetiza esses documentos, apresentando as suas conclusões de uma forma integrada por forma a realçar a continuidade e transversalidade do trabalho desenvolvido e proporcionar uma perspetiva de futuro do esforço que é ainda necessário concretizar para uma gestão efetiva do risco de aluviões na ilha da Madeira.

O relatório está organizado da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta uma breve caracterização do fenómeno das aluviões.

O capítulo 3 apresenta os valores de projeto de precipitações intensas e de caudais de ponta de cheia para 26 bacias hidrográficas da ilha da Madeira, elementos necessários à verificação do risco de inundação e ao dimensionamento de eventuais obras de proteção. Esses elementos foram também utilizados pela equipa responsável pela produção dos principais instrumentos de aplicação da diretiva europeia relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações, nomeadamente as cartas de inundação e de risco de inundação e o Plano de Gestão do Risco de Inundações (PGRI). Ainda sobre a aplicação desta diretiva à ilha da Madeira, o capítulo 8 discute os principais fatores a ter em conta nesse exercício e apresenta algumas recomendações.

O capítulo 4 descreve o trabalho desenvolvido na identificação das condições que são necessárias para que deslizamentos de vertentes ocorram. Os principais resultados desse trabalho são mapas de perigosidade de deslizamentos, a quantificação dos volumes de material mobilizado pelos deslizamentos e uma proposta preliminar de um critério de avaliação do risco de deslizamento que pode ser integrado num sistema de previsão e alerta de aluviões. Para realização deste trabalho foram adquiridas e analisadas imagens de satélite de alta resolução e utilizados modelos digitais de terreno resultantes de voos de reconhecimento com equipamento LIDAR.

O capítulo 5 analisa o fenómeno da erosão hídrica distribuída no espaço, também designada por erosão específica, apresentando cartas que quantificam este fenómeno.

Completando os trabalhos desenvolvidos para quantificação do fenómeno das aluviões, apresenta-se no capítulo 6 os resultados dos exercícios de simulação matemática integrada do escoamento líquido e transporte do material sólido. Os resultados apresentados para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal e da ribeira de Machico permitem quantificar com maior rigor as áreas afetadas pelas aluviões, uma vez que o transporte de grandes quantidades de material sólido de granulometria variada é considerado de forma explícita. A prazo, o sistema de previsão e alerta de aluviões deverá desejavelmente incorporar um modelo de simulação deste tipo.

O capítulo 7 apresenta os princípios orientadores para a proteção contra as aluviões e como podem ser concretizadas com medidas de prevenção e proteção que foram estudadas nas duas fases do EARAM. A Diretiva relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações, cuja a aplicação à ilha da Madeira é analisada no capítulo 8, é um dos instrumentos dessa visão integrada de gestão do risco.

O capítulo 9 reúne os contributos das várias componentes do trabalho desenvolvido e descreve como podem ser incorporados num sistema de previsão e alerta de aluviões.

O capítulo 10 descreve os resultados de um inquérito realizado sobre a perceção da população ao risco das aluviões com o objetivo de analisar os condicionalismos sociais de uma estratégia de gestão do risco e de proteção das populações.

Finalmente, o capítulo 11 apresenta a síntese do trabalho desenvolvido e um conjunto de recomendações para o futuro.

2 Caracterização geral do fenómeno das aluviões

2.1 Características e complexidade do fenómeno

A ocorrência de cheias repentinas (torrenciais) com um transporte muito significativo de material sólido constitui um dos processos mais perigosos e destrutivos nas regiões montanhosas, nomeadamente em bacias hidrográficas com pequena área, vales encaixados e linhas de água com declive acentuado. A grande quantidade de detritos sólidos transportados é proveniente de derrocadas ou de deslizamentos nas encostas, da ação erosiva do escoamento e da existência de depósitos nos leitos das linhas de água. As misturas de água e sólidos transportados podem ter uma elevada densidade (com 60 a 70 % em peso de material sólido).

Este fenómeno é designado na literatura especializada pelo termo geral, em inglês, de “*debris flow*” o qual caracteriza o escoamento gravítico de uma mistura de água e sedimentos ou detritos sólidos que se comporta como se fosse um fluido contínuo com grande mobilidade (Takahashi, 2007). Na realidade, esta é uma designação geral que abrange diversos subtipos de escoamentos. O curso de um escoamento com estas características gerais compreende três partes distintas:

- Bacia de receção ou origem principal dos detritos, com declives muito elevados e com depósitos de material sólido mobilizável;
- Canal de condução, onde o escoamento adquire elevadas velocidades e transporta a mistura polifásica de água, lamas e detritos;
- Cone de dejeção, nas zonas mais a jusante ou com menor declive e menos encaixadas, onde uma parte do material sólido tende a depositar por diminuição da respetiva capacidade dinâmica.

O processo descrito vai depender de um conjunto de circunstâncias e de fatores locais associados ao desencadear de cada evento e às características dos escoamentos resultantes, nomeadamente as respeitantes aos volumes e caudais de água e de sólidos.

Entre outros fatores salientam-se os meteorológicos, geológicos, geotécnicos, geomorfológicos e o tipo de coberto vegetal. Contudo, este tipo de escoamento está sempre associado ou é desencadeado por precipitações muito intensas.

Na ilha da Madeira, este tipo de fenómeno é designado por aluvião e constitui o fenómeno natural mais perigoso para os respetivos habitantes, conforme tem sido salientado por diversos autores (e.g. Quintal, 1999a e 1999b; Rodrigues D. & Francisco Ayala-Carcedo 2000, 2003; Rodrigues, 2005; e Abreu, Tavares e Rodrigues, 2008). Com efeito, o impacto, com elevada velocidade, de uma grande quantidade de detritos sólidos pode provocar elevados danos pessoais e materiais e destruições em estruturas (habitações, pontes e outras edificações). Por seu turno, a deposição de elevados

volumes de material sólido, em zonas a jusante com menor declive, agrava as consequências das inundações ao obstruir vias de comunicação e interromper o funcionamento de infraestruturas básicas. As figuras seguintes são referentes ao evento que ocorreu a 20 de fevereiro de 2010.



Figura 1 - Deposição de material sólido junto à Ribeira de João Gomes (Funchal).



Figura 2 - Ocupação por detritos do trecho canalizado da Ribeira de Santa Luzia (Funchal).



Figura 3 - Material sólido depositado no leito da Ribeira de São João (Funchal).



Figura 4 - Moradias e estrada danificadas pela aluvião (Meia Légua).

O impacto social e mediático do evento de 20 de fevereiro de 2010 suscitou o interesse da comunicação social e a intervenção pública de especialistas tendo sido publicados artigos com a descrição do fenómeno, dos principais fatores críticos associados e com propostas de mitigação do respetivo risco (e.g. Valente, 2010 e Silva, Almeida e Gomes, 2010). Este evento proporcionou a formação da equipa técnica que elaborou a 1ª e 2ª fases do EARAM.

A componente ou fase sólida do processo é a que induz uma grande complexidade e perigosidade ao fenómeno e faz diferenciar, de modo muito significativo, este tipo de cheia de outras, nomeadamente das cheias que ocorrem usualmente noutras áreas do território nacional. Com efeito, o controlo da formação e da propagação dos escoamentos mistos de água e material sólido, com elevadas velocidades e concentrações de detritos de grande dimensão, exige conhecimentos e dados específicos. Por seu turno, o desencadeamento destes escoamentos em resultado de uma precipitação intensa depende, conforme já foi referido, da conjugação de um conjunto de fatores locais, alguns dos quais de natureza aleatória.

Salienta-se que uma precipitação muito intensa pode originar, ou não, uma aluvião. Sendo necessária a conjugação de diversos fatores para que tal ocorra, existe naturalmente uma indeterminação potencial sobre a ocorrência deste tipo de fenómeno.

Não é conhecido um critério universal para a definição das condições necessárias e suficientes que desencadeiem uma aluvião com uma determinada intensidade. A identificação e obtenção de correlações empíricas, validadas a nível regional, exige uma recolha contínua de informações e de dados quantitativos consistentes ao longo de um conjunto numeroso de anos com ocorrências deste tipo de eventos por forma a ser possível definir os indicadores de aviso ou de alerta mais fiáveis. Neste domínio, salienta-se o trabalho pioneiro, a nível internacional, de Nel Caine em 1980, sobre a utilização de curvas de intensidade e duração de precipitação no desencadeamento de movimentos de massa e de escoamentos de detritos ou *debris flows* (Caine, 1980). Este trabalho e a metodologia semi-empírica (tem uma base teórica) e simplificada proposta têm vindo a ser aplicados e melhorados em diversas partes do mundo, nomeadamente em algumas zonas de Portugal, conforme é referenciado em Stark et al (2008 e 2007) e Zêzere, Ferreira e Rodrigues (1999).

Para além da grande dificuldade na previsão e caracterização estatística (atribuição de períodos de retorno aos eventos) dos eventos com determinadas características (caudais e volumes líquidos e sólidos, granulometria e distribuição espacial de detritos), há a referir a complexidade na modelação e previsão do processo de transporte e deposição. Com efeito, a simulação do comportamento das misturas muito heterogéneas de água e sedimentos sólidos, como escoamentos de um pseudo-fluido contínuo conduzido pela gravidade, e que têm uma grande mobilidade derivada da presença da água ou de lamas nos espaços intersticiais das referidas misturas, exige um modelo matemático complexo.

O estado atual dos conhecimentos é ainda incompleto quanto à caracterização da reologia das aluviões e quanto ao seu comportamento dinâmico. Sabe-se que a reologia das aluviões, da qual depende a respetiva perda de energia cinética, é determinada pelas características geométricas e mecânicas das partículas do material sólido, pelas características do escoamento, pela concentração e distribuição granulométrica dos detritos e por fatores externos como o declive do leito. Todavia, não existem formulações universais que reúnam consenso da comunidade científica. É, assim, necessário que a modelação matemática seja sujeita a uma calibração para as condições particulares das bacias hidrográficas em que vão ser aplicadas.

Esta dificuldade operacional e a carência de dados mais abrangentes dificultam muito a capacidade de previsão das características dos eventos futuros e a capacidade de controlar o dimensionamento adequado de estruturas de proteção ou de conhecer a

capacidade de vazão em secções críticas das linhas de água, nomeadamente nas áreas edificadas nos cones de dejeção.

Tendo em conta estes condicionamentos, a estruturação do controlo efetivo deste tipo particular de cheias, com as condições locais adversas da ilha da Madeira, é muito mais difícil do que a simples aplicação de procedimentos de conhecimentos já consolidados para os outros casos de proteção contra cheias e inundações e exige para o seu estudo a conjugação de diferentes saberes pluridisciplinares.

Estas dificuldades também são sentidas em outras zonas do mundo (e.g. em zonas alpinas da Europa) onde fenómenos semelhantes ocorrem com frequência e com grande perigosidade. Algumas ocorrências provocaram elevados danos e vítimas mortais como foi o caso da enxurrada que ocorreu em dezembro de 1999 na Venezuela que, segundo as estimativas da cruz vermelha internacional provocou cerca de 30.000 mortos.

A melhoria dos conhecimentos científicos e técnicos, aliada à capacidade computacional, têm permitido avanços significativos na simulação e previsão do comportamento dos escoamentos mistos. A experiência empírica, acumulada por estudos e recolha sistemática de dados específicos, pela construção e exploração de estruturas de retenção e proteção e a melhoria nos sistemas de previsão e alerta têm permitido a implementação de sistemas especiais de mitigação do risco em algumas zonas do mundo. Salientam-se os casos da Itália e da Áustria na Europa e do Japão na Ásia, existindo numerosa bibliografia recente sobre este tópico (e.g. Casale e Margottini, 1999 e Takahashi, 1991 e 2007, entre outros). Trata-se, contudo, de um domínio científico longe de estar consolidado e onde a investigação prossegue. Em Portugal, este tópico também é muito inovador e tem merecido um esforço de investigação aplicada, em particular na ilha da Madeira, conforme se evidencia no presente relatório.

Em resultado da elevada complexidade do fenómeno, a previsão de ocorrências, do comportamento dos escoamentos bifásicos e dos efeitos dos respetivos impactos nos bens expostos comporta ainda muitas incertezas:

- Incertezas na previsão efetiva de ocorrências de deslizamentos de vertente com uma determinada abrangência e magnitude (níveis de alarme);
- Incertezas na caracterização e no comportamento dos escoamentos ao longo dos vales (caudais líquidos e sólidos, velocidades e alturas máximas),
- Incertezas na caracterização das inundações e na distribuição do material sólido depositado;
- Incertezas na eficácia de medidas de proteção ou de gestão do risco.

Salienta-se, ainda, a dificuldade numa avaliação sistematizada da influência, no processo, do tipo de coberto vegetal e dos efeitos dos incêndios florestais nas bacias de receção.

2.2 Antecedentes da ilha da Madeira.

O fenómeno das aluviões na Madeira tem sido referenciado em vários trabalhos de carácter mais ou menos científico, por vezes com a designação quase equivalente de “torrente”.

Ao abordar os cursos de água da ilha da Madeira, Pereira (1939), sublinha a quase ausência de caudal das ribeiras na estação do Verão, sendo que no Inverno «...*crestem torrencialmente, transbordam das margens e arrastam das montanhas toneladas de penedos, rolando-os e batendo uns contra os outros num ruído sinistro e aterrador, ao mesmo tempo que arrebatam terrenos de cultura, derrubam pontes e chegam por vezes a causar enormes prejuízos em habitações, pessoas, terras e animais*».

Ruy Mayer apresenta a definição de uma “torrente” como sendo “uma água que só corre copiosamente durante as temporadas ou chuvas grossas, e sempre com grande violência, sendo o seu leito sujeito a muitas variações e irregularidades, pela curta duração das cheias” (Mayer, 1991, pp. 10, citando Nogueira da Gama). Citando bibliografia clássica anterior, Ruy Mayer indica que “as “torrentes” têm uma propriedade perfeitamente específica: escavam na montanha, depositam no vale e divagam depois, em consequência dos depósitos”. Citando Scipion Gras, Mayer realça as seguintes duas características deste tipo de curso de água: a aparição brusca e a violência das cheias e o facto de os declives serem acentuados e irregulares. No seu trabalho apresenta uma classificação das “torrentes” e a composição típica das mesmas: bacia de receção, canal de condução e leito ou cone de dejeção. Ruy Mayer inclui ainda no seu trabalho métodos e obras de correção das “torrentes” e de consolidação de ravinas. As características das “torrentes” e dos fatores associados à respetiva correção são objeto de desenvolvimento no livro elaborado por Campos Andrade (Andrade, 1982) no qual são referidos exemplos de intervenções em Portugal, nomeadamente na ilha de Porto Santo. Andrade indica que uma “torrente” é todo o curso de água sujeito a cheias súbitas, embora de curta duração, onde a água atinge apreciável velocidade, essencialmente na parte superior do curso, em função da grande inclinação do leito (em geral mais de 6% e nunca menos de 2%) ou do acréscimo de densidade provocado pelos carrejos (Andrade, 1982, pp. 18).

Nesta obra, o autor faz referência explícita à bacia de receção e troço inicial do canal de condução da ribeira de Santa Luzia, na encosta sul do Pico do Areeiro, assinalando ter sido esta encosta uma das responsáveis pela aluvião de 9 de outubro de 1803 que destruiu parte da cidade do Funchal.

Orlando Ribeiro, ao comentar o regime das águas na ilha da Madeira, refere algumas «inundações catastróficas» que assolaram a ilha. Tais calamidades estão associadas a «chuvas excepcionais... frequentemente desastrosas, que enchem as ribeiras, arrastam blocos com algumas centenas de quilos, destroem pontes, danificam casas, inundando a parte baixa das aglomerações situadas à beira-mar, e pondo em perigo bens e pessoas» (Ribeiro, 1985). Uma compilação recente e pormenorizada da história das aluviões foi realizada por Raimundo Quintal em dois artigos (Quintal, 1999a e 1999b). O Quadro 1, elaborado no âmbito do relatório final da 1ª Fase do EARAM (2010), sintetiza as principais aluviões ocorridos nos séculos XIX e XX e início do sec. XXI e as suas principais consequências. Uma parte da informação aqui apresentada foi adaptada de Lopes (2003) e (Lopes & Aguiar, 2009a e 2009b).

O Anexo 1 apresenta uma lista mais completa deste tipo de eventos na ilha da Madeira.

Quadro 1 - 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

Data	Zona	Vítimas e danos
22 Dezembro de 2009	Madalena do Mar e S. Vicente	Destruição de vias de comunicação e habitações

Em consequência da aluvião de 1803, as ribeiras da cidade do Funchal foram canalizadas, sob a direção do Brigadeiro Reinaldo Oudinot, entre 1804 e 1806. Não obstante estas obras, em 1815 e em 1842 ocorreram cheias que provocaram alguns danos na cidade. Para além dos eventos registados no Quadro 1, ocorreram muitos outros que não tiveram consequências tão graves: “Houve mais aluviões, porém menos trágicos e temerosos, em 18 de novembro de 1765; 20 de novembro de 1848; 6 de janeiro de 1856; 1 de janeiro de 1876; 3 de outubro de 1895; 9 de novembro de 1901; 26 de fevereiro de 1920; 6 de março de 1921” (Pereira, 1939).

Posteriormente ao evento relevante que ocorreu em 2010, têm ocorrido outros acontecimentos menos significativos nomeadamente em 2012 (5 e 6 de novembro na Ribeira da Janela e São Vicente) e em 2013 (28 e 29 de novembro no Santo de Serra e Porto da Cruz).

Nas últimas dezenas de anos foram executados estudos e intervenções para regularização dos leitos das ribeiras e proteção de zonas urbanas em expansão. Na sequência da ocorrência de cheias mais violentas foram sendo estudadas e propostas medidas especiais, nomeadamente para a proteção da cidade do Funchal. Algumas destas propostas não se revelaram exequíveis (e.g. o desvio de cheias para o mar através de túneis). Estudos hidrológicos e hidráulicos mais recentes apresentaram propostas de correção pontual dos leitos de ribeiras como foi o caso do estudo elaborado pela Hidrotécnica Portuguesa para a ribeira de Santa Luzia, entre Viveiros e Tornos, após a aluvião de 29 de outubro de 1993.

O primeiro Plano Regional da Água da Madeira (PRAM) (SRA/INAG, 2003) identificou este tipo de risco, descreve as respetivas características e propõe algumas medidas específicas.

Esta realidade exige medidas de proteção e de gestão do risco o mais fiáveis e rigorosas possíveis. Com efeito, as características naturais da ilha são muito favoráveis à formação de aluviões com elevada perigosidade: disponibilidade de material sólido (detritos) facilmente mobilizável nas encostas e leitos de ribeiras, em particular na sequência de precipitações intensas, formação muito rápida de cheias (bacias com um tempo de resposta relativamente curto). Por seu turno, verifica-se uma significativa exposição ao perigo das vias de comunicação antigas e de zonas construídas, em particular nas zonas terminais (cones de dejeção) das ribeiras, ocupadas por construções e zonas urbanas. É o caso das principais localidades e áreas urbanas consolidadas. A ocupação de algumas encostas potencialmente suscetíveis de instabilizarem durante períodos de elevada

precipitação, torna o processo particularmente difícil no que respeita a prevenção do risco.

Com efeito, num território com pouca disponibilidade de áreas planas ou adequadas para uma expansão urbana e industrial livre dos perigos de enxurradas, de deslizamentos ou de outras instabilidades geotécnicas, o fenómeno das aluviões na ilha da Madeira constitui, simultaneamente, um processo natural complexo e uma ameaça à segurança de pessoas e bens.

Na sequência do evento de 20 de fevereiro de 2010 e com o apoio do EARAM, as entidades competentes fizeram diversas intervenções nas linhas de água e foram implementadas algumas medidas estruturais significativas nos trechos considerados mais críticos. O evento de 2010 constituiu um laboratório natural para caracterização e estudo tendo sido mobilizados, no âmbito do EARAM, diferentes instrumentos de identificação, modelação e análise com base em tecnologias avançadas.

3 Estimativas de precipitação e de caudal líquido

A Diretiva e Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações (Diretiva 2007/60/CE), transposta para o direito nacional através do Decreto-Lei nº 115/2010, tem por objetivo estabelecer prioridades e para tomar decisões técnicas, financeiras e políticas em matéria de gestão dos riscos de inundações. Para tal cada estado membro é obrigado a:

- Efetuar a avaliação preliminar de riscos de inundações e propor as zonas de riscos potenciais significativos de inundações;
- Elaborar as cartas de zonas inundáveis para áreas de risco e as cartas de risco de inundações;
- Elaborar e implementar os planos de gestão de riscos de inundações (PGRI).

Estas tarefas devem ser realizadas para cada região hidrográfica, cabendo à Direção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território (DROTA) da Secretaria Regional do Ambiente (SRA) essa incumbência para a Região Hidrográfica 10 (Região Autónoma da Madeira).

O documento produzido pela SRA/DROTA “Implementação da Diretiva nº 2007/60/CE na Região Autónoma da Madeira” identifica 27 zonas críticas na RAM que, por isso, devem ser objeto de caracterização, mapeamento e de medidas de intervenção a incluir no PGRI.

No âmbito do EARAM procedeu-se à caracterização das bacias hidrográficas das 27 zonas críticas identificadas na RAM, com exceção da Ribeira do Tanque que se localiza em Porto Santo. Os resultados foram inicialmente produzidos no quadro da tese de mestrado *Avaliação do risco de aluviões das ribeiras da ilha da Madeira* (Caetano, 2014) e, posteriormente, revistos no âmbito do EARAM.

Para cada bacia, ou sub-bacia, foram estimados a área e o declive médio da bacia hidrográfica, o número de escoamento para condições de humidade do solo AMIII, o tempo de concentração estimado através da fórmula do SCS (*Soil Conservation Service*) e ainda os valores de caudal de ponta de cheia relativos aos períodos de retorno de 20, 50, 100 e 500 anos.

Os valores do caudal de ponta de cheia foram calculados pelo modelo HEC-HMS, assumindo o hidrograma unitário do SCS e um número de escoamento CN para condições de humidade do solo AMCIII. Na determinação do número utilizou-se a Carta de Solos da ilha da Madeira (IICT et al., 1992) e a Carta de Uso do Solo da Madeira (COSRAM, 2007), escala 1:10 000, com resolução de 0.25 ha de área mínima cartográfica.

Na estimativa do tempo de concentração, foram estudadas várias fórmulas para estimar o de tempo de concentração, nomeadamente Giandotti, Kirpich, Temez e SCS, tendo-se

constatado que as fórmulas de Kirpich e do SCS eram aquelas que propiciam as menores estimativas do tempo de concentração e que, por isso, determinam caudais de ponta de cheia mais elevados.

Os hietogramas de projeto foram calculados a partir de mapas de precipitação diária máxima anual para os períodos de retorno de 20, 50, 100 e 500 anos obtidos por interpolação por co-krigagem de estimativas pontuais da precipitação em 66 estações. Os valores pontuais da precipitação diária máxima anual para os vários períodos de retorno foram estimados pela análise dos máximos anuais dos registos de 44 estações, com mais de 29 anos de dados, e pela análise das séries de duração de parcial de 12 estações, com registos entre 10 e 20 anos de dados. No primeiro caso, aplicou-se a função de distribuição de probabilidades generalizada de extremos (GEV) de distribuição, na sequência da avaliação do ajustamento aos registos observados pelas distribuições log-normal de dois parâmetros (lei de Galton), log-normal de três parâmetros, generalizada de extremos (*Generalized Extreme Values*, GEV), Gumbel (GEV tipo I), Pearson tipo III e a log-Pearson tipo III. No segundo caso, selecionou-se um nível de corte x_0 que assegurasse a verificação da hipótese de Poisson e, paralelamente, que os valores superiores a x_0 seguissem uma distribuição generalizada de Pareto.

Para permitir o cálculo de precipitações associadas a duração sub-diárias determinaram-se a mediana dos quocientes entre a precipitação máxima anual numa duração d e a precipitação diária máxima anual. Reconhece-se que estes quocientes podem depender do período de retorno, conforme é o caso de Portugal Continental (Brandão et al., 2001), mas neste estudo não se disponha de dados suficientes para validar essa hipótese.

Os hietogramas de projeto foram obtidos a partir dos valores de precipitação discretizada em intervalos de 15 minutos, adotando a proposta do *Hydrologic Engineering Centre* de considerar uma distribuição balanceada (triangular) da precipitação.

O Quadro 2 identifica as bacias hidrográficas incluídas no sistema de modelação hidrológica e que coincidem com as 26 zonas críticas identificadas na ilha da Madeira no documento produzido pelo SRA e DROTA “Implementação da Diretiva nº 2007/60/CE, de 23 de outubro, transposta pelo Decreto-Lei nº 115/2010, de 22 de outubro (Diretiva sobre a Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações) na Região Autónoma da Madeira”. São também apresentadas as principais características das bacias hidrográficas e suas sub-bacias hidrográficas, nomeadamente a área e o declive médio da bacia hidrográfica, o número de escoamento para condições de humidade do solo AMCIII, o tempo de concentração estimado através da fórmula do SCS (*Soil Conservation Service*).

Quadro 2: Bacias hidrográficas incluídas no sistema de modelação hidrológica

Nº	Bacia hidrográfica	Secção (cota)	Área da bacia (km ²)	Área da sub-bacia (km ²)	Declive médio da bacia (%)	Declive médio da sub-bacia (%)	CN AMIII (-)	Tconc (h)
1	Ribeira da Madalena do Mar	Ribeira da Madalena, entre Casa Velha e Achada da Silva (344m)	9.59	7.54	52.4	46.8	89	0.3
		Foz		2.06		73.0	90	0.6
2	Ribeira da Ponta do Sol	Cruzamento entre Ribeira da Ponta do Sol e Ribeiro Frio, Lombo das Terças (347m)	19.06	13.47	67.3	67.6	89	0.5
		Foz		5.59		66.7	91	0.6
3	Ribeira da Tabua	Ribeira da Tabua, entre Vale Zimbreiro e Ribeiro da Tabua (348m)	8.75	5.57	68.4	68.5	89	0.5
		Foz		3.17		68.3	90	0.3
4	Ribeira Brava	Entre Pereira e Pinheiro, perto da Serra de Água - Este (291m)	41.07	15.45	84.0	89.0	89	0.5
		Entre Pereira e Pinheiro, perto da Serra de Água - Oeste (291m)		5.70		94.0	89	0.3
		Ribeira de Serra de Água, perto de Pomar da Rocha (93m)		15.39		80.6	89	0.4
		Foz		4.54		65.8	89	0.3
5	Ribeira do Vigário	Ribeira da Caixa, entre Furneira e Foro (495m)	15.42	5.46	47.3	51.7	90	0.5
		Foz		9.97		44.8	93	0.5
6	Ribeira dos Socorridos	Cruzamento entre Ribeira do Curral e Ribeira do Cidrão, entre Achada e Poço do Borralho (509m)	38.75	15.78	100.8	112.9	89	0.4
		Foz		22.97		92.6	90	0.8
7	Ribeira do Ribeiro Seco	Foz	2.74		22.8		96	0.5
8	Ribeira de S. João	Ribeira de Santo António, Boieiro (658m)	14.65	4.40	50.0	62.0	89	0.5
		Foz		10.25		44.8	93	0.6
9	Ribeira de Santa Luzia	Ribeira de Santa Luzia, entre Lombo da Ameixeira e Barreira (462m)	14.21	7.35	60.6	73.4	89	0.5
		Foz		6.86		46.8	93	0.5

Nº	Bacia hidrográfica	Secção (cota)	Área da bacia (km²)	Área da sub-bacia (km²)	Declive médio da bacia (%)	Declive médio da sub-bacia (%)	CN AMIII (-)	Tconc (h)
10	Ribeira de João Gomes	Ribeira de João Gomes/ Arrebetão (690m)	11.52	4.99	50.5	40.7	89	0.6
		Foz		6.53		57.9	88	0.9
11	Ribeiro da Nora	Foz	1.77		28.2		96	0.4
12	Ribeiro do Lazareto	Foz	3.91		44.2		91	0.5
13	Ribeira da Abegoaria	Foz	2.66		36.6		91	0.7
14	Ribeira do Porto Novo	Ribeira do Porto Novo, entre Cancela e Eiras de Dentro (692 m)	17.04	6.21	48.2	42.8	89	0.5
		Foz		10.83		51.2	90	0.6
15	Ribeira da Boaventura	Ribeiro dos Vinháticos, Eiras Velhas (480m)	10.42	6.17	49.5	44.7	89	0.7
		Foz		4.25		56.5	90	0.4
16	Ribeira de Santa Cruz	Ribeira de Santa Cruz, Poiso (493m)	12.81	7.61	42.1	32.6	89	0.7
		Foz		5.20		56.0	90	0.5
17	Ribeira de Machico	Ribeira de Machico, entre Maroços e Ribeira Grande (176m)	24.37	11.24	51.0	50.8	89	0.5
		Foz		13.12		51.2	91	0.5
18	Ribeira da Maiata	Foz	5.38		68.2		90	0.4
19	Ribeira do Junçal	Foz	4.59		67.1		90	0.5
20	Ribeira do Faial	Ribeiro Frio, perto de Banda da Rocha (319m)	49.82	11.76	83.4	62.2	88	0.7
		Ribeira da Metade, perto de Cova do Rocha Machado (468m)		8.83		116.9	89	0.4
		Ribeira Seca, perto de Fajã dos Pombos (350m)		7.64		104.7	89	0.3
		Foz		21.6		73.7	88	0.5
21	Ribeira de São Jorge	Ribeira de S. Jorge, Achada do Milheiro/Achada do Negro (196m)	32.18	14.32	78.9	97.3	88	0.5
		Foz		17.86		64.2	89	0.5
22	Ribeira do Porco (Boaventura)	Ribeira do Porco, entre Lombo do Urzal e Falca de Cima (350m)	20.12	10.87	101.8	115.4	88	0.5
		Foz		9.25		85.8	89	0.3
23	Ribeira dos Moinhos (Boaventura)	Foz	5.12		72.5		89	0.5

Nº	Bacia hidrográfica	Secção (cota)	Área da bacia (km ²)	Área da sub-bacia (km ²)	Declive médio da bacia (%)	Declive médio da sub-bacia (%)	CN AMIII (-)	Tconc (h)
24	Ribeira de São Vicente	Ribeira de S. Vicente, entre Limoeiro e Corrida (118m)	37.71	25.51	79.2	80.8	89	0.6
		Foz		12.21		76.0	89	0.3
25	Ribeira da Laje	Foz	1.72		84.2		88	0.3
26	Ribeira da Janela	Próximo do cruzamento: Ribeiro dos Bodes e Ribeira da Janela (505m)	51.49	19.24	59.6	39.4	89	1.3
		Foz		32.26		71.7	88	0.5

O Quadro 3 apresenta as estimativas dos valores máximos anuais da precipitação em 6 horas para os vários períodos de retorno, obtidos pelo método de interpolação espacial de krigging.

Quadro 3: Estimativas dos valores máximos anuais da precipitação em 6 horas, obtidos pelo método de interpolação espacial de krigging (mm).

Nº	Sub-bacia	Altitude média (m)	T=20 anos	T=50 anos	T=100 anos	T=500 anos
1	Rib. Madalena Jus	391	113	129	141	170
1	Rib. Madalena Mont	1069	123	141	155	190
2	Rib. Pta do Sol Jus	423	116	132	144	173
2	Rib. Pta do Sol Mont	1166	133	153	168	207
3	Rib. Tabua Jus	362	120	137	149	180
3	Rib. Tabua Mont	925	124	142	156	190
4	Rib. Brava Jus	347	120	138	151	184
4	Rib. Brava M1	933	147	171	191	248
4	Rib. Brava M2	952	139	161	179	228
4	Rib. Brava M3	718	125	144	158	196
5	Rib. Vigário Jus	518	119	138	154	195
5	Rib. Vigário Mont	938	130	150	167	211
6	Rib. Socorridos Jus	772	139	162	180	230
6	Rib. Socorridos Mont	1166	156	182	203	262
7	Rib. do Ribeiro Seco	186	124	141	155	188
8	Rib. S. João Jus	504	130	150	165	205
8	Rib. S. João Mont	1291	150	174	193	243
9	Rib. Sta Luzia Jus	442	129	150	165	203
9	Rib. Sta Luzia Mont	1210	147	170	187	232
10	Rib. João Gomes Jus	665	132	152	167	202

Nº	Sub-bacia	Altitude média (m)	T=20 anos	T=50 anos	T=100 anos	T=500 anos
10	Rib. João Gomes Mont	1225	142	162	177	215
11	Ribeiro da Nora	264	130	151	167	207
12	Ribeiro do Lazareto	511	130	151	166	203
13	Rib. da Abegoaria	538	128	147	161	193
14	Rib. Porto Novo Jus	597	129	148	161	194
14	Rib. Porto Novo Mont	1114	142	162	177	213
15	Rib. Boaventura Jus	479	128	147	161	195
15	Rib. Boaventura Mont	959	145	166	181	218
16	Rib. Sta Cruz Jus	475	133	151	165	197
16	Rib. Sta Cruz Mont	812	144	164	179	215
17	Rib. Machico Jus	286	132	151	165	197
17	Rib. Machico Mont	559	138	157	172	206
18	Rib. da Maiata	319	140	161	177	215
19	Rib. do Juncal	400	150	172	189	229
20	Rib. Faial Jus	490	155	180	199	249
20	Rib. Faial M1	1068	151	173	189	227
20	Rib. Faial M2	1151	153	176	193	240
20	Rib. Faial M3	1093	156	181	201	254
21	Rib. S. Jorge Jus	621	146	173	198	272
21	Rib. S. Jorge Mont	948	144	172	197	274
22	Rib. Porco Jus	483	144	174	201	287
22	Rib. Porco Mont	1006	150	178	202	273
23	Rib. Moinhos - Boav	617	147	177	204	289
24	Rib. S. Vicente Jus	615	152	179	201	266
24	Rib. S. Vicente Mont	824	151	178	201	266
25	Ribeira da Laje	643	139	163	183	239
26	Rib. Janela Jus	748	129	153	172	228
26	Rib. Janela Mont	1257	136	157	174	219

O Quadro 4 apresenta as estimativas dos valores máximos anuais da precipitação em 6 horas para os vários períodos de retorno, obtidos pelo método de interpolação espacial de kriging.

Quadro 4: Estimativas de caudal de ponta de cheia

Nº	Bacia hidrográfica	Secção (cota)	Área da bacia (km ²)	Área da sub bacia (km ²)	CN AMIII (-)	Tconc (h)	Q20 (m ³ /s)	Q50 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)	Q500 (m ³ /s)
1	Ribeira da Madalena do Mar	Ribeira da Madalena, entre Casa Velha e Achada da Silva (344m)	9.59	7.54	89	0.3	158	187	209	264

Nº	Bacia hidrográfica	Secção (cota)	Área da bacia (km ²)	Área da sub bacia (km ²)	CN AMIII (-)	Tconc (h)	Q20 (m ³ /s)	Q50 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)	Q500 (m ³ /s)
		Foz		2.06	90	0.6	170	200	223	282
2	Ribeira da Ponta do Sol	Cruzamento entre Ribeira da Ponta do Sol e Ribeiro Frio, Lombo das Terças (347m)	19.06	13.47	89	0.5	256	302	337	425
		Foz		5.59	91	0.6	287	337	376	472
3	Ribeira da Tabua	Ribeira da Tabua, entre Vale Zimbreiro e Ribeiro da Tabua (348m)	8.75	5.57	89	0.5	93	109	122	154
		Foz		3.17	90	0.3	112	132	147	184
4	Ribeira Brava	Entre Pereira e Pinheiro, perto da Serra de Água - Este (291m)	41.07	15.45	89	0.5	340	403	457	607
		Entre Pereira e Pinheiro, perto da Serra de Água - Oeste (291m)		5.70	89	0.3	136	161	182	238
		Ribeira de Serra de Água, perto de Pomar da Rocha (93m)		15.39	89	0.4	300	355	398	507
		Foz		4.54	89	0.3	787	933	1051	1369
5	Ribeira do Vigário	Ribeira da Caixa, entre Furneira e Foro (495m)	15.42	5.46	90	0.5	180	213	239	310
		Foz		9.97	93	0.5	206	245	276	359
6	Ribeira dos Socorridos	Cruzamento entre Ribeira do Curral e Ribeira do Cidrão, entre Achada e Poço do Borrvalho (509m)	38.75	15.78	89	0.4	405	482	545	720
		Foz		22.97	90	0.8	527	626	707	929
7	Ribeira do Ribeiro Seco	Foz	2.74		96	0.5	55	63	70	85
8	Ribeira de S. João	Ribeira de Santo António, Boieiro (658m)	14.65	4.40	89	0.5	189	221	246	310
		Foz		10.25	93	0.6	213	251	280	355
9	Ribeira de Santa Luzia	Ribeira de Santa Luzia, entre Lombo da Ameixeira e Barreira (462m)	14.21	7.35	89	0.5	153	181	202	257
		Foz		6.86	93	0.5	200	236	264	333
10	Ribeira de João Gomes	Ribeira de João Gomes/Arrebetão (690m)	11.52	4.99	89	0.6	92	107	119	148
		Foz		6.53	88	0.9	132	155	172	212
11	Ribeiro da Nora	Foz	1.77		96	0.4	41	47	53	66
12	Ribeiro do Lazareto	Foz	3.91		91	0.5	74	88	98	122
13	Ribeira da Abegoaria	Foz	2.66		91	0.7	43	51	56	69
14	Ribeira do Porto Novo	Ribeira do Porto Novo, entre Cancela e Eiras de Dentro (692)	17.04	6.21	89	0.5	126	147	162	199

Nº	Bacia hidrográfica	Secção (cota)	Área da bacia (km ²)	Área da sub bacia (km ²)	CN AMIII (-)	Tconc (h)	Q20 (m ³ /s)	Q50 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)	Q500 (m ³ /s)
		Foz		10.83	90	0.6	219	257	286	353
15	Ribeira da Boaventura	Ribeiro dos Vinháticos, Eiras Velhas (480m)	10.42	6.17	89	0.7	110	129	142	175
		Foz		4.25	90	0.4	137	160	177	217
16	Ribeira de Santa Cruz	Ribeira de Santa Cruz, Poiso (493m)	12.81	7.61	89	0.7	133	155	171	209
		Foz		5.20	90	0.5	167	194	215	262
17	Ribeira de Machico	Ribeira de Machico, entre Maroços e Ribeira Grande (176m)	24.37	11.24	89	0.5	221	259	287	352
		Foz		13.12	91	0.5	313	365	403	493
18	Ribeira da Maiata	Foz	5.38		90	0.4	124	145	161	200
19	Ribeira do Junçal	Foz	4.59		90	0.5	99	116	128	159
20	Ribeira do Faial	Ribeiro Frio, perto de Banda da Rocha (319m)	49.82	11.76	88	0.7	223	260	287	355
		Ribeira da Metade, perto de Cova do Rocha Machado (468m)		8.83	89	0.4	207	220	271	345
		Ribeira Seca, perto de Fajã dos Pombos (350m)		7.64	89	0.3	204	230	263	342
		Foz		21.6	88	0.5	771	868	1004	1274
21	Ribeira de São Jorge	Ribeira de S. Jorge, Achada do Milheiro/Achada do Negro (196m)	32.18	14.32	88	0.5	381	467	542	767
		Foz		17.86	89	0.5	454	561	655	938
22	Ribeira do Porco (Boaventura)	Ribeira do Porco, entre Lombo do Urzal e Falca de Cima (350m)	20.12	10.87	88	0.5	224	273	315	439
		Foz		9.25	89	0.3	288	352	410	600
23	Ribeira dos Moinhos (Boaventura)	Foz	5.12		89	0.5	106	132	155	227
24	Ribeira de São Vicente	Ribeira de S. Vicente, entre Limoeiro e Corrida (118m)	37.71	25.51	89	0.6	513	620	711	972
		Foz		12.21	89	0.3	607	733	839	1142
25	Ribeira da Laje	Foz	1.72		88	0.3	41	49	56	76
26	Ribeira da Janela	Próximo do cruzamento: Ribeiro dos Bodes e Ribeira da Janela (505m)	51.49	19.24	89	1.3	234	276	314	409
		Foz		32.26	88	0.5	614	752	868	1196

As Notas Técnicas D2 e F1 descrevem em maior pormenor a metodologia aplicada e os resultados obtidos.

Esses resultados foram utilizados pela equipa responsável pela produção dos principais instrumentos de aplicação da diretiva europeia sobre o risco o risco de inundações, nomeadamente as cartas de inundação e de risco de inundação e o Plano de Gestão do Risco de Inundações (PGRI).

Foi ainda transferido para o LREC todo o acervo informático de modelação que permite replicar os resultados alcançados ou a proceder a uma análise de sensibilidade face a diferentes premissas. Esse pacote pode também ser utilizado para estimar hidrogramas de cheias resultantes de eventos pluviosos concretos.

4 Perigosidade de deslizamentos

4.1 Introdução

Um sistema de alerta de deslizamentos (movimentos de massa) tem por objetivo avisar as entidades competentes e a população para a possibilidade de ocorrência deste tipo de fenómenos. Para desenvolver um tal sistema é importante avaliar os fatores condicionantes que determinam quais as áreas potencialmente suscetíveis à ocorrência de deslizamentos e monitorizar os fatores que ocorrem de forma esporádica e que são responsáveis pelo impulso que desencadeia o movimento num determinado momento.

Neste trabalho procurou-se desenvolver uma metodologia para estabelecer estados de alerta que permitam avisar a população, colocar de prontidão as equipas de emergência e, assim prevenir os danos de maior dimensão. Estes estados de alerta devem ser estabelecidos com base:

- Num mapa de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos que localiza as zonas mais sujeitas a movimentos de massa, em função de um conjunto de fatores estáticos, como por exemplo a altitude, o declive do terreno e o coberto vegetal (fatores condicionantes);
- Registo de valores precipitação com uma intensidade e duração acima de determinados limiares críticos (fatores desencadeantes).

O mapa de suscetibilidade foi construído com base numa análise de correlação entre a delimitação das cicatrizes dos deslizamentos ocorridos no evento de 20 de fevereiro de 2010 e um conjunto de fatores estáticos (e.g. declive e altitude do terreno) que influenciam a localização, padrão e densidade espacial dos movimentos de massa.

Os limiares críticos de intensidade e duração de precipitação foram identificados a partir da inventariação de eventos de deslizamentos ocorridos e registados na ilha da Madeira por pesquisa bibliográfica entre o período de janeiro de 2002 a novembro de 2014.

A metodologia desenvolvida pressupõe o desenvolvimento prévio de uma metodologia para inventariação rápida dos deslizamentos ocorridos e de outra, baseada em modelos digitais do terreno dedicados, para a avaliação dos volumes de material sólido produzido.

Este capítulo encontra-se dividido em sete subcapítulos. Ao primeiro, introdutório, segue-se a apresentação da informação utilizada. No terceiro apresenta-se resumidamente a metodologia desenvolvida, baseada em técnicas da análise de imagem, para a inventariação rápida dos deslizamentos ocorridos em determinado evento. No quarto descreve-se o processo utilizado para a previsão do volume de material sólido circulante. O quinto subcapítulo é dedicado à modelação da

suscetibilidade de acontecer deslizamentos e o sexto à definição de níveis de alerta. A modelação da incerteza da modelação é apresentada no sétimo subcapítulo.

4.2 Informação utilizada

A informação de base utilizada neste capítulo inclui:

- Imagens multiespectrais Geoeye, Ikonos, QuickBird e WorldView (listadas no Quadro 5) adquiridas após o evento de fevereiro – 23 e 28 de fevereiro de 2010 com elevada resolução espacial;
- Modelo digital de terreno, com o sistema de coordenadas UTM – Fuso 28 N, Datum BaseSE Porto Santo 1995 e MDT posterior ao acidente obtido por aerofotogrametria de voo de 2010. A escala de produção é de 1:5000, com resolução final de 5 metros para ficheiros MDT – GRID;
- Carta geológica (escala 1:80000) do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) de 2009 em formato Shape File;
- Carta de ocupação do solo de 2007 (COSRAM_2007). Escala 1:10000, 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);
- Carta de solos em formato *shape file*;
- Precipitação acumulada 2001-2009;
- Inventariação dos movimentos de massa delimitados para os anos 2008, 2011 e 2012.
- Diferentes atributos topográficos do terreno recolhidos em ortofotomapas pré (2007) e pós-evento (2010) cedidos pela DSIGC, com bandas RGB de 0,4 m de resolução espacial e sistema de coordenadas UTM (zona 28);
- Modelo digital de terreno de 2009 obtido por LIDAR (Light Detection And Ranging) à escala 1:2000, sendo a resolução final 4m;
- Levantamento *in situ* de 30 cicatrizes de deslizamentos pela DRIGOT.

4.3 Análise de imagens de deteção remota para inventariação rápida e automática dos deslizamentos ocorridos

As principais características dos deslizamentos que ocorrem em grande número na ilha da Madeira são as suas relativas pequenas dimensões (tipicamente algumas dezenas de m² em área) e as suas profundidades pouco acentuadas (da ordem de 1-2 metros de altura). A identificação destas áreas só é, por isso, possível recorrendo a imagens de deteção remota de muito elevada resolução espacial (escala sub-métrica).

A pesquisa e verificação da existência de imagens de deteção remota com essas características englobando a ilha da Madeira (parcial ou totalmente) foi efetuada nas bases de dados dos satélites de muito elevada resolução espacial, de forma a constituir uma lista tão completa quanto possível de imagens, com indicação da sua qualidade relativamente às características atmosféricas (cobertura de nuvens, por exemplo). Esta pesquisa incluiu imagens posteriores a 1999 do primeiro satélite desta geração (Ikonos), mas também imagens de todos os satélites com características análogas (QuickBird, GeoEye, WorldView).

Simultaneamente, identificaram-se em jornais, revistas ou outro tipo de publicação, as ocorrências de fenómenos atmosféricos de magnitude anormal e que possam ter dado origem a deslizamentos significativos na ilha da Madeira. Com estas 2 listas selecionaram-se como imagens prioritárias as obtidas numa data imediatamente posterior (ou próxima) ao evento atmosférico anormal, de forma a obter as cicatrizes dos deslizamentos com as características visuais (espectrais) mais semelhantes às da data da sua formação. Constituiu-se desta forma um conjunto de imagens de dimensão considerável da ilha da Madeira entre os anos de 2003 e 2012, tal como se detalha no Quadro 5.

As áreas cobertas em cada período são distintas o que permite efetuar dois tipos de análises:

- Cobertura de praticamente toda a ilha num único período (na mesma data ou em datas muito próximos, como se verifica em 2011 e em 2012);
- Cobertura de regiões mais pequenas (por exemplo, bacias do Funchal e Ribeira Brava) em várias datas de um período temporal alargado (por exemplo, entre 2003 e 2012).

O pré-processamento destas imagens de satélite consistiu essencialmente em correções geométricas mais pormenorizadas (ortorrectificações), através da incorporação da informação altimétrica fornecida pelo modelo digital de elevação disponível, de melhor resolução do que aquele que é utilizado pelos fornecedores das imagens (muito generalista e de baixa resolução). Efetuou-se o registo ou alinhamento entre si das imagens das diferentes datas, tentando utilizar tanto quanto possíveis métodos automáticos. Esta tarefa revelou-se ser bastante complicada e morosa nas regiões de relevo mais acidentado (por exemplo, Ribeira Brava), em que o recurso à componente pericial manual foi mais frequente. Foi também construída informação de referência (*ground-truth*) nas imagens de todas as datas com delineação dos deslizamentos. Cada deslizamento identificado e delineado globalmente foi ainda separado em duas das suas componentes: cicatriz e zona de transporte (ou rasto).

Quadro 5 - Lista de imagens na base de dados de imagens de satélite de muita elevada resolução espacial da ilha da Madeira.

#	Satélite	Data	Região coberta aproximada
1	QuickBird	2003-09-14	Centro – Sul
2	QuickBird	2003-11-30	Centro – Norte
3	QuickBird	2004-04-12	Oeste – Sul
4	QuickBird	2005-01-12	Este – Norte
5	QuickBird	2005-01-25	Oeste – Norte
6	QuickBird	2006-07-22	Este – Sul
7	QuickBird	2006-08-24	Bacias Funchal + Ribeira Brava
8	QuickBird	2008-04-02	Bacia Funchal
9	QuickBird	2008-04-15	Bacia Ribeira Brava
10	GeoEye-1	2009-07-21	Bacias Funchal + Ribeira Brava
11	GeoEye-1	2009-07-29	Bacias Funchal + Ribeira Brava
12	GeoEye-1	2010-02-23	Bacias Funchal + Ribeira Brava
13	GeoEye-1	2010-02-28	Bacias Funchal + Ribeira Brava
14	GeoEye-1	2011-09-28	Norte-Centro
15	GeoEye-1	2011-10-06	Sul-Este
16	GeoEye-1	2011-10-20	Oeste
17	WorldView-2	2012-12-15	Oeste
18	WorldView-2	2012-12-15	Este
19	WorldView-2	2012-12-20	Centro

Após a seleção e o pré-processamento das imagens desenvolveu-se e validou-se uma metodologia capaz de efetuar a inventariação automática de deslizamentos de vertente através da classificação de imagens de deteção remota de muito elevada resolução espacial (diferentes sensores e em diferentes datas).

A área das bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal (Figura 6) foi selecionada como a principal zona de estudo, onde foram definidas regiões de treino e de validação da metodologia. A correta validação da metodologia obriga que estas regiões sejam obrigatoriamente disjuntas, ou seja, as regiões utilizadas no treino do classificador não podem ser utilizadas depois no seu teste ou validação.

Adotaram-se metodologias de classificação do tipo supervisionado, em detrimento das não-supervisionadas, visto as classes a identificar estarem claramente bem reconhecidas. Acresce que a elevada quantidade de informação disponível sobre as classes de interesse permite dispor de um conhecimento pericial adicional relevante para a sua identificação de uma forma mais clara.

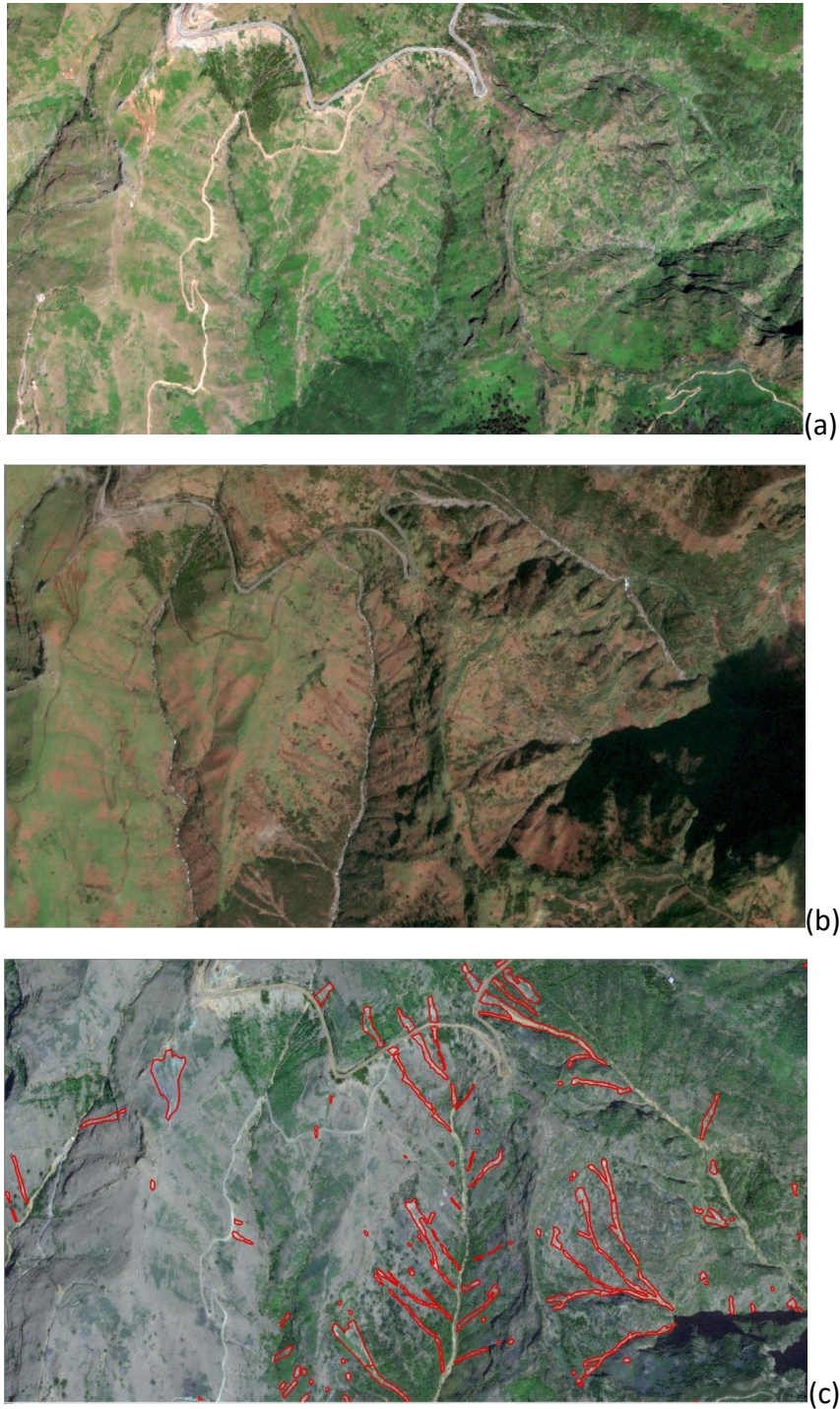


Figura 5 - Análise multitemporal da mesma região em imagens de: (a) 2009: sem deslizamentos; (b) 2010: com deslizamentos criados durante o evento de 20-fev-2010 e (c) 2011: regeneração da vegetação com identificação dos deslizamentos de 2010.

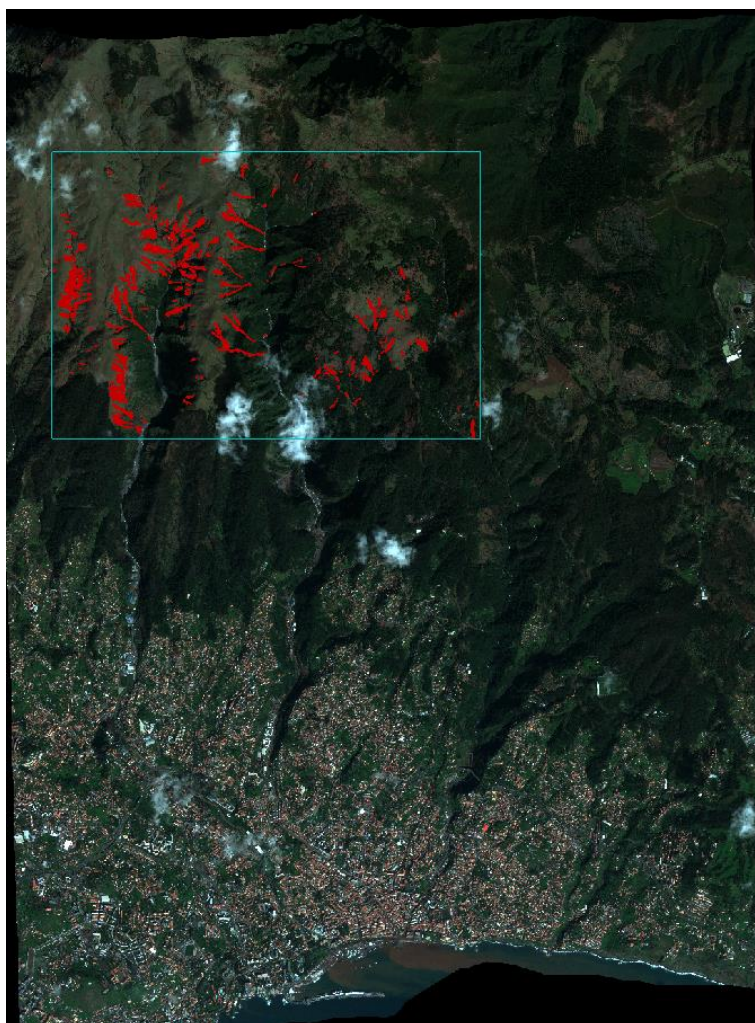


Figura 6 - Localização da zona de teste a norte da cidade do Funchal com indicação dos deslizamentos de referência (a vermelho).

Efetuarão-se variados testes de classificação, comparando diferentes métodos (mais simples e mais complexos, mais antigos e mais recentes), utilizando como elementos de classificação, quer as unidades elementares da imagem digital (pixel), quer as unidades elementares da textura (objetos). Os objetos são uma designação genérica que se dá às regiões espectralmente homogéneas de uma imagem.

A Figura 7 apresenta o fluxo de processamento das imagens que inclui 2 fases: 1) segmentação da imagem com os parâmetros ótimos de forma a determinar os seus objetos e 2) classificação supervisionada desses objetos, utilizando descritores espectrais, texturais e radiométricos. Esta metodologia é automática, mas obriga à afinação de alguns parâmetros que dependem das características das imagens de deteção remota em análise, nomeadamente da meteorologia no período da aquisição (incidência solar ou existência de cobertura de nuvens ou nevoeiro). Numa fase preliminar uma pequena zona de teste, com uma dimensão proporcional à dimensão da

zona afetada ou coberta pela imagem de satélite, deve ser selecionada para determinar os valores mais adequados para os parâmetros dos algoritmos.

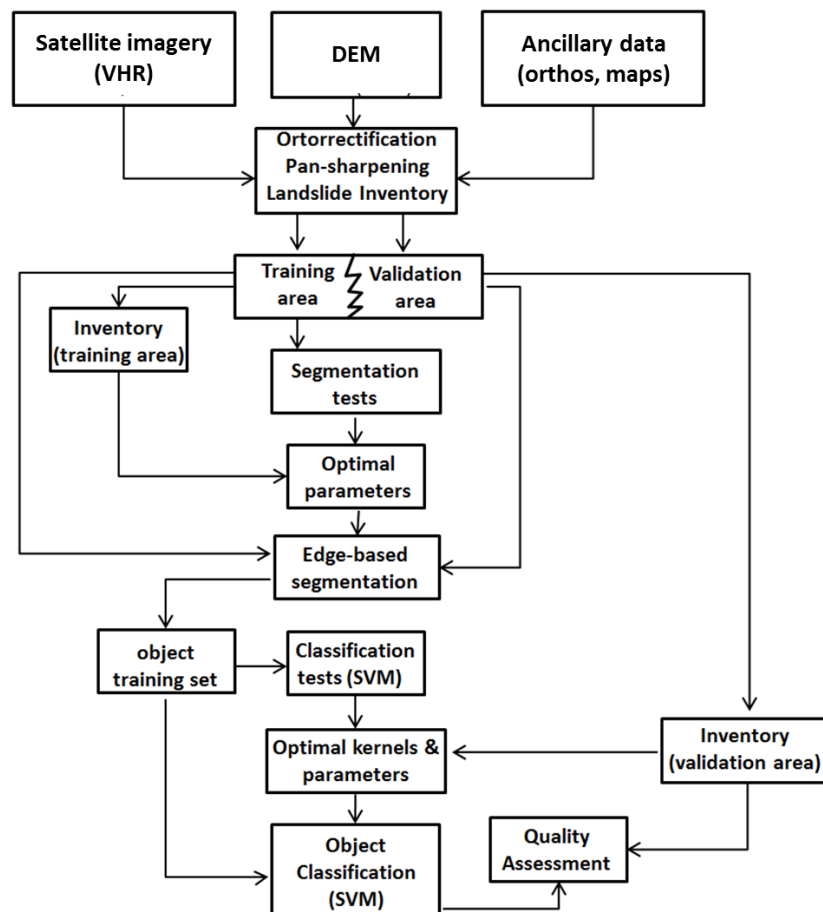


Figura 7 – Fluxograma global dos procedimentos de processamento das imagens de deteção remota e de informação adicional (se existente), desde o seu pré-processamento até à extração dos deslizamentos

Identificação das cicatrizes de deslizamento e deslizamentos completos

A delineação das cicatrizes de deslizamentos e deslizamentos teve por base a observação da banda *pansharped* das imagens Geoeye, a partir das quais se realizou o inventário de deslizamentos entre 2003 e 2012 (2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2010, 2011 e 2012) para as bacias hidrográficas do Funchal e Ribeira Brava. O ano de 2011 foi a exceção, cujo inventário foi realizado para toda a ilha da Madeira. Para o cálculo de volumes apenas foi utilizado o ano do evento (2010).

Os princípios para a sua delineação foram:

- Delinear todas as áreas afetadas das bacias do Funchal e Ribeira Brava;
- Não considerar zonas de nuvem e sombra;

- Recorrer aos ortofotomapas onde zonas da imagem Geoeye não sejam claras a olho nu, mas nunca classificar de todo o que não está na imagem Geoeye, a fim de se encontrar ocorrências entre diferentes anos.

Validação de cicatrizes

A validação da metodologia está descrita na nota técnica mencionada anteriormente (Nota Técnica B4).

4.4 Estimativas de volumes de deslizamentos associados aos eventos estudados

Na metodologia desenvolvida, a estimativa dos volumes de material sólido proveniente dos deslizamentos ocorridos em determinado evento é obtida por diferença entre dois modelos digitais do terreno que reproduzam a altimetria antes e pós evento. A disponibilidade de modelos digitais de terreno (MDT) de elevada resolução espacial é essencial. Neste trabalho utilizou-se um modelo digital de terreno de 2010 obtido por processos de restituição fotogramétrica com 2 m de resolução espacial. Este modelo foi adensado a partir do MDT com 5 m de resolução, caracterizado pelo erro máximo admissível de 0.75m e 1.25 m respetivamente em planimetria e altimetria.

Os principais passos da metodologia desenvolvida para o cálculo dos volumes de material sólido produzido são:

- Identificação e delimitação das cicatrizes de deslizamentos ocorridos pelo operador;
- Obtenção da superfície com as diferenças altimétricas entre o modelo pré-evento, normalizado para uma resolução de 2m, e o modelo pós-evento para utilização dessa diferença nos passos seguintes;
- Cálculo do volume por comparação entre o modelo digital do terreno anterior ao evento e o modelo obtido após o evento.

No interior das cicatrizes mapeadas o cálculo do volume foi determinado a partir das diferenças entre o modelo pré-evento (2009) reamostrado em células de dimensão de 2m e o modelo digital do terreno de 2010 utilizando o software ArcGIS da ESRI.

O primeiro passo consiste na extração da altimetria do interior das cicatrizes quer de 2009 quer de 2010, utilizando a ferramenta *extract by mask*, recorrendo aos polígonos das cicatrizes. De seguida, convertem-se os contornos das cicatrizes em formato vetorial para formato matricial, de forma a atribuir um código de identificação a cada cicatriz, utilizando a ferramenta *convert polygon to raster*. Por último, calcula-se a diferença entre as altimetrias de 2009 e 2010 extraídas anteriormente, através do *raster calculator*. Concluídos os passos anteriores, cria-se a tabela de estatísticas com todos os atributos para cada cicatriz. Através do *zonal statistics as table*, define-se como *input* a

matriz com os códigos dos polígonos criados no 2º passo. Em *zone field* seleciona-se *value*. O *input value raster* resulta da diferença entre 2009 e 2010 criados no 3º passo e por último seleciona-se SUM em *statistics type*. A tabela terá no seu conteúdo a área e volume para cada cicatriz. Para obter a profundidade média, basta multiplicar o volume pela área. Os valores positivos correspondem à perda de volume e os valores negativos correspondem a depósito.

Estatísticas obtidas para a Ribeira Brava

Total de 1849 cicatrizes

1390 com perda de material

458 com acumulação (24.77%)

62928.57m³ de escavação

Profundidade média de escavação – 0.40m

Estatísticas obtidas para o Funchal

Total de 2963 cicatrizes

2596 com perda de material

367 com acumulação (12.38%)

91370.83m³ de escavação

Profundidade média de escavação – 0.64m

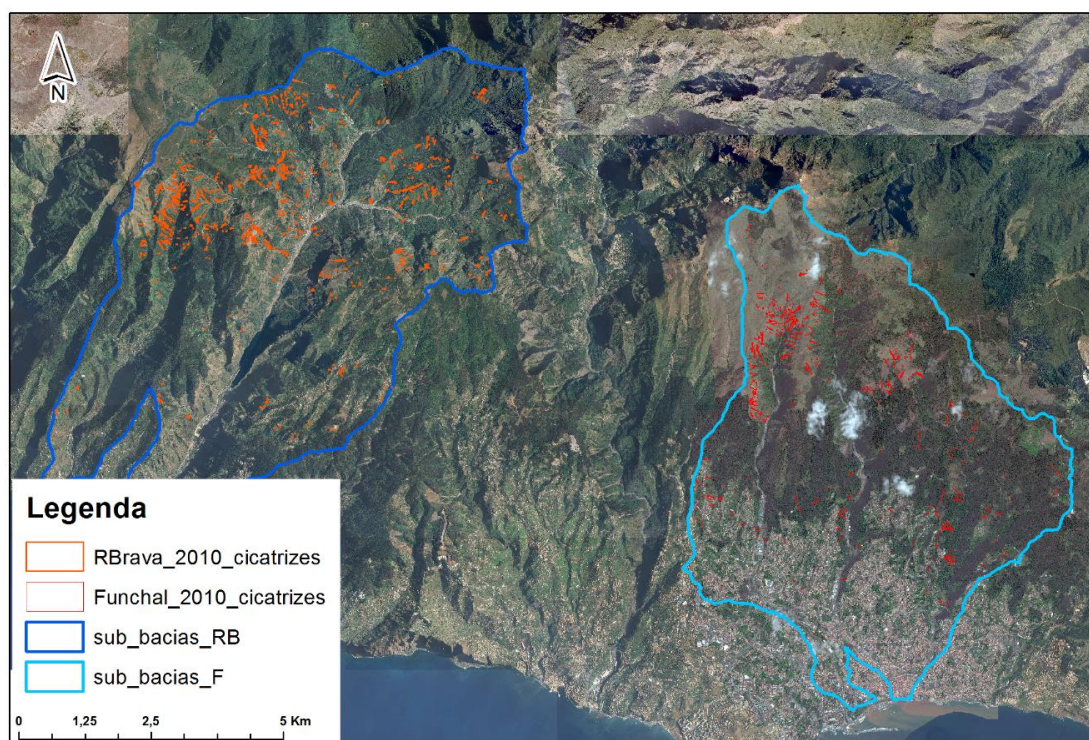


Figura 8 - Levantamento das cicatrizes de deslizamento para a Ribeira Brava e o Funchal

4.5 Mapas de perigosidade de deslizamento para a Madeira

Diferentes atributos topográficos do terreno podem ser modelados a partir de um MDT. Neste trabalho e através de ferramentas disponíveis no software ArcGIS, modelou-se o declive e a exposição.

O mapa da precipitação acumulada para o período de janeiro de 2001 a dezembro de 2009 foi modelado com base nos dados de precipitação diária de 18 postos e estações distribuídos pela ilha da Madeira. O método geoestatístico utilizado foi a simulação sequencial direta. Com simulações de igual probabilidade de ocorrência foram geradas e foi construído um mapa médio das simulações.

Toda a informação foi reunida numa malha quadrada de 40 por 40 metros com o objetivo de uniformizar a unidade base da informação. Para os fatores qualitativos, como é o caso da ocupação do solo, cada célula da malha tomou o valor com maior área de ocupação. Para os fatores quantitativos, altitude e declive, uma vez a informação original ter uma resolução superior (5 por 5 metros), conservou-se o valor máximo, mínimo e médio. Este último processo levou à transformação destes dois fatores em 3 fatores: máximo, mínimo e média. O mapeamento das cicatrizes de movimentos de massa, nos vários períodos de tempo, também foi convertido para uma malha de 40 por

40 metros, sendo que, uma célula foi considerada ativa (tomando o valor 1) se no mínimo 10% da sua área fosse preenchida por cicatriz(es) e não ativa caso contrário (tomando o valor 0). A título de exemplo, apresenta-se no primeiro mapa, da Figura 9, os polígonos delimitados para um conjunto de cicatrizes, e no segundo mapa (malha de 40 por 40 metros) as células consideradas ativas representadas a vermelho e as não ativas a branco.

Quadro 6 - Fatores condicionantes candidatos.

Fator condicionante	Abreviatura
Declive médio	Dmédio
Declive máximo	Dmax
Declive mínimo	Dmin
Altitude média	Amédia
Altitude máxima	Amax
Altitude mínima	Amin
Exposição	E
Geologia	Geo
Tipo de solo	Solo
Ocupação do solo	OS
Precipitação acumulada (2011-2009)	Pac

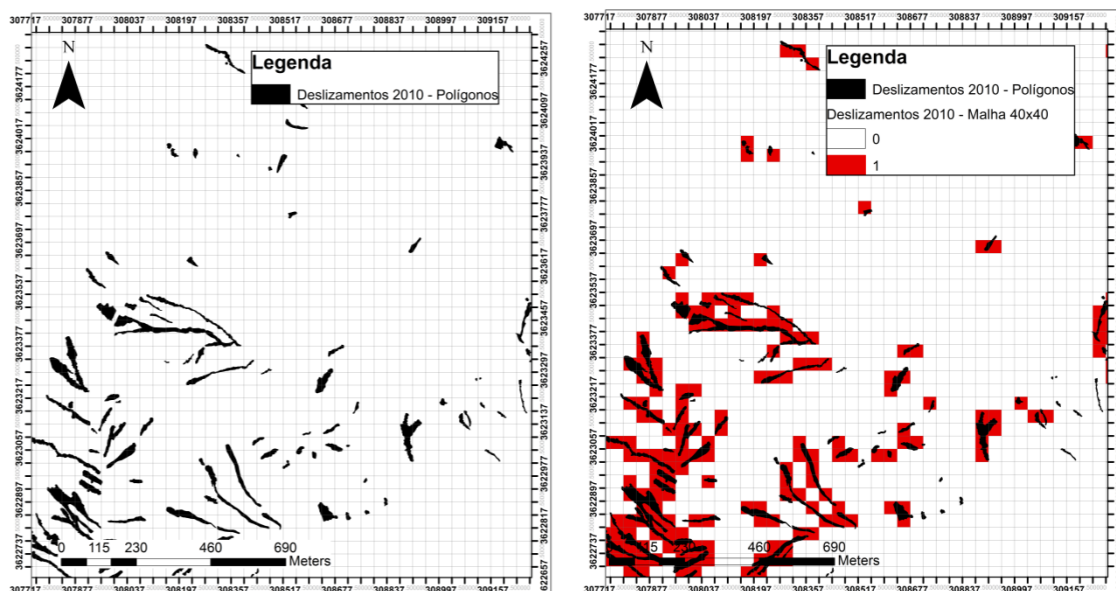


Figura 9 - Cicatrizes em forma de polígonos (esquerda) e cicatrizes na base da malha quadrada (célula activa: vermelho; célula não activa: branco) (direita).

O modelo de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa foi construído com base nas cicatrizes de 2010 referentes ao evento de 20 de fevereiro. Três áreas da região do Funchal foram selecionadas como zonas de treino do modelo e a área total da região

da Ribeira Brava e do Funchal como zonas de teste analisando as cicatrizes de 2008 e 2010 e a área total da ilha da Madeira para as cicatrizes de 2011.

Para a modelação foi adotado um dos casos particulares dos modelos lineares generalizados, a regressão logística. A regressão logística estima a probabilidade de uma resposta binária com base em uma ou mais variáveis explicativas. A variável resposta, neste caso, é a presença ou ausência de cicatrizes e as variáveis explicativas candidatas são os fatores condicionantes. O critério de informação de Akaike (AIC) foi utilizado para selecionar o modelo que melhor ajuste apresenta ao conjunto de dados. Do conjunto das variáveis candidatas a integrarem o modelo de regressão logística, quatro foram selecionadas atendendo o critério AIC: precipitação acumulada 2001-2009, declive mínimo, declive médio e ocupação do solo (Equação 1).

$$p(\text{Deslizamentos}) = -7.19 + 3.50 \times 10^{-04} PN + 3.57 \times 10^{-2} D_{\text{min}} + 3.31 \times 10^{-2} D_{\text{médio}} + 2.94OS_2 + 1.02OS_3 \pm 1.39OS_5 \quad \text{Equação 1}$$

Da Figura 10 à Figura 13 apresentam-se os mapas dos quatro fatores que integram o modelo de regressão logística e na Figura 14 o mapa de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa da ilha da Madeira.

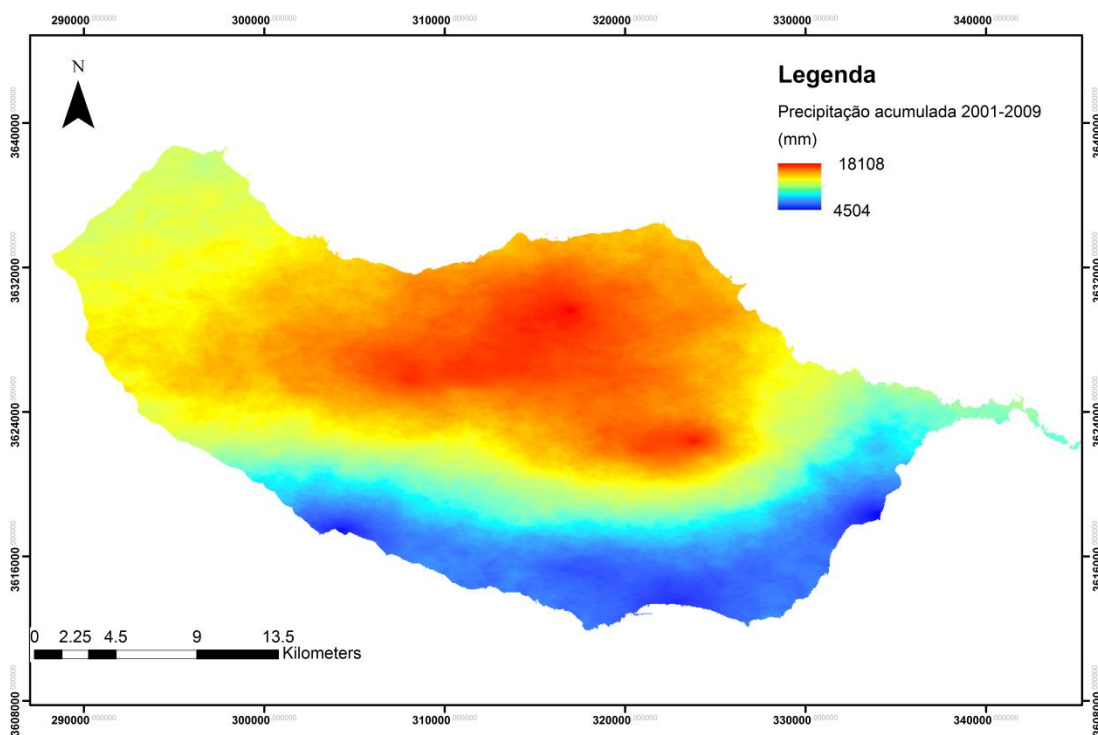


Figura 10: Mapa de precipitação acumulada entre 2001 e 2009 (resolução 40 por 40 metros).

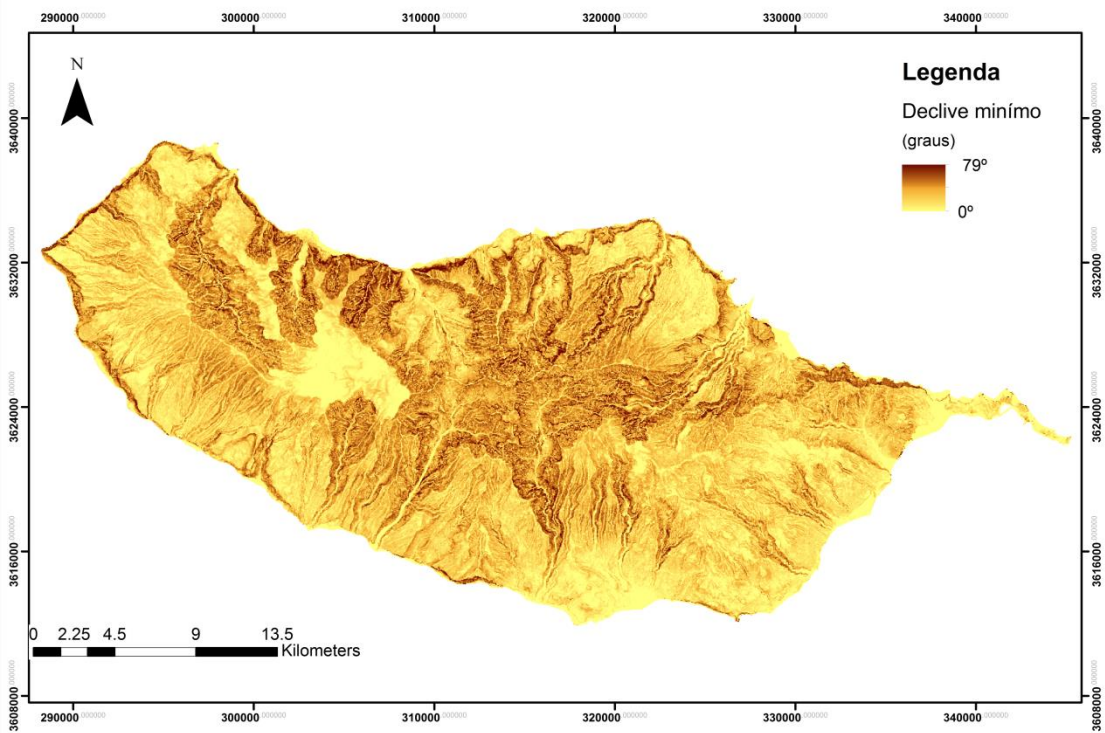


Figura 11: Mapa de declive mínimo (resolução 40 por 40 metros).

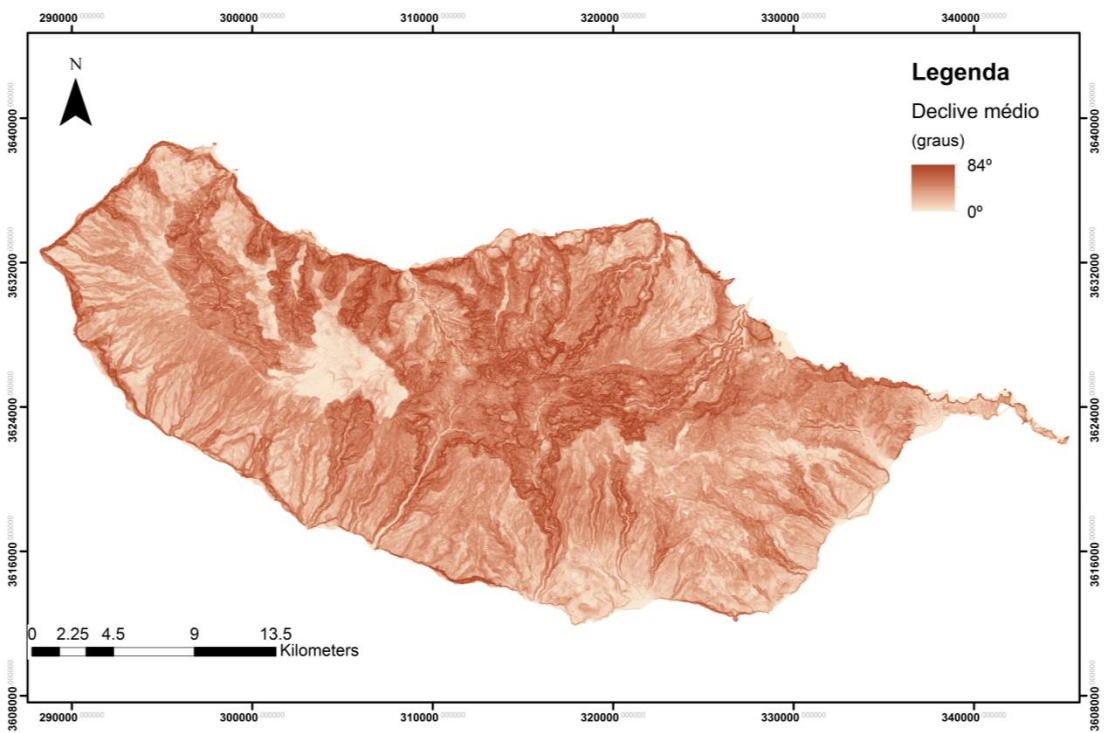


Figura 12: Mapa de declive médio (resolução 40 por 40 metros).

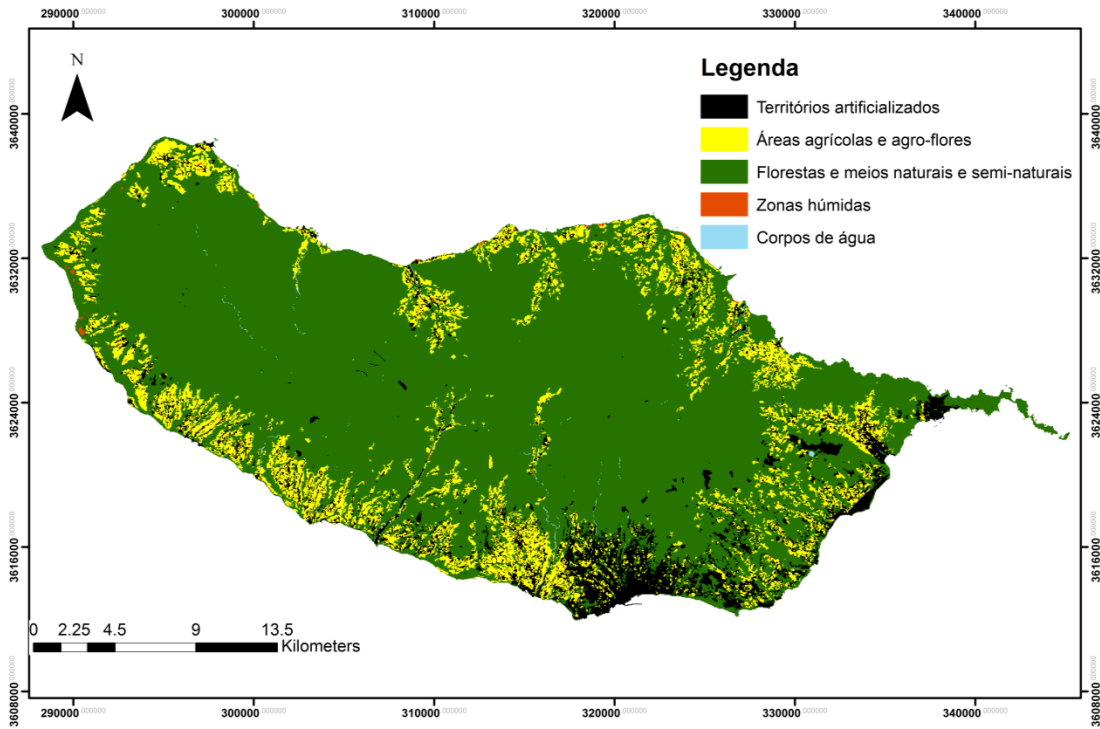


Figura 13: Mapa de ocupação do solo (COS2007, 5 níveis) (resolução 40 por 40 metros).

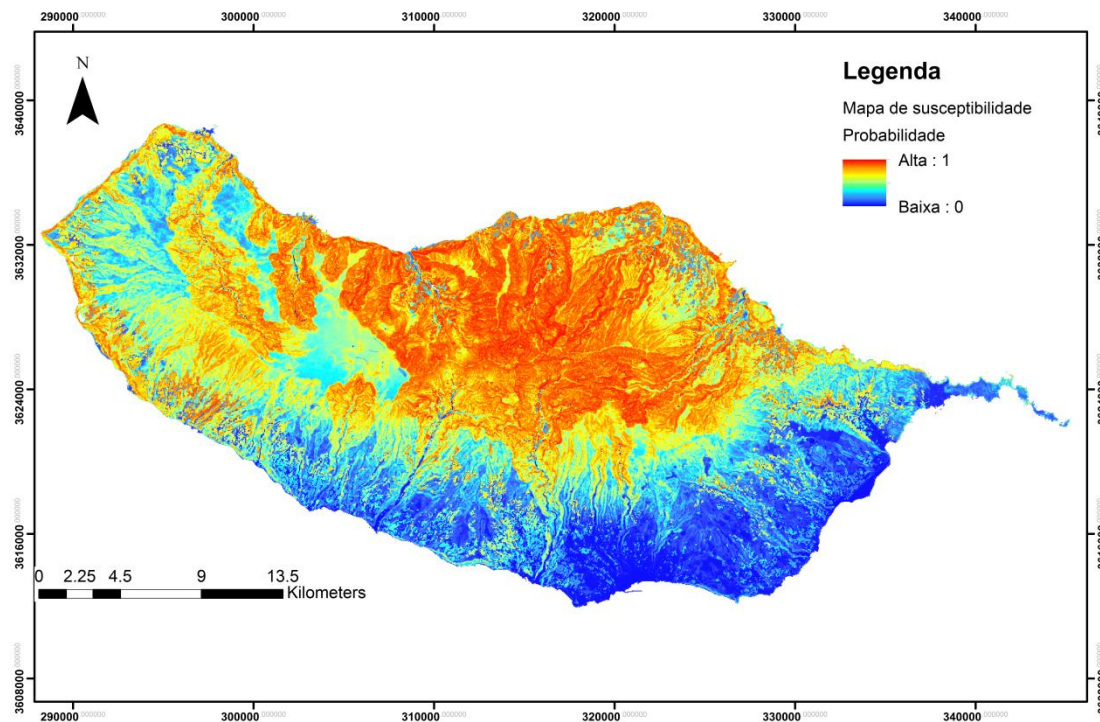


Figura 14: Mapa de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa (resolução 40 por 40 metros).

Para validar o modelo (Equação 1) transformou-se a probabilidade numa resposta binária selecionando um valor de corte. O valor que permite obter igual percentagem de verdadeiros positivos e verdadeiros negativos foi escolhido como valor de corte, ou seja, o valor para o qual se obtém igual percentagem de células ativas e não ativas bem classificadas. Selecionado o valor de corte ($P_{corte} = 0.42$) construiu-se um mapa com duas classes: suscetível a deslizamentos e não suscetível a deslizamentos (Figura 15 e Figura 16). No Quadro 7 apresentam-se os valores das células bem e mal classificadas para as cicatrizes de 2008, 2010 e 2011.

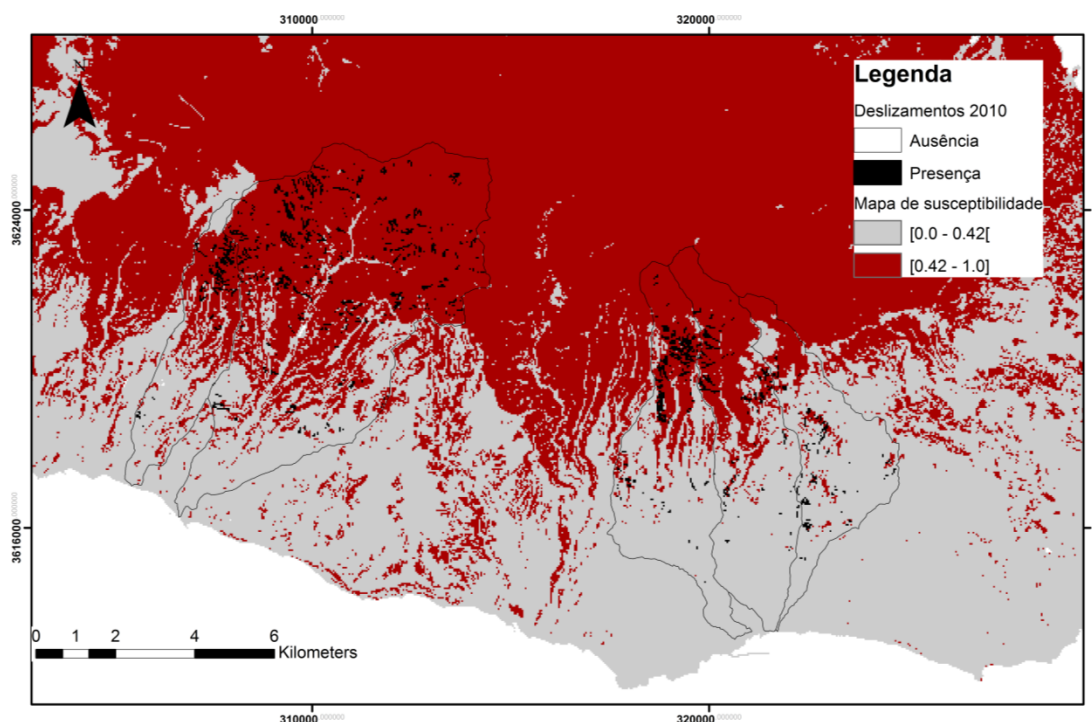


Figura 15: Mapa de suscetibilidade binário com sobreposição das cicatrizes de 2010 (células a preto) para a região da Ribeira Brava e Funchal. Vermelho: células suscetíveis a deslizamentos (probabilidade superior a 0.42). Cinzento: células não suscetíveis a deslizamentos (probabilidade inferior a 0.42).

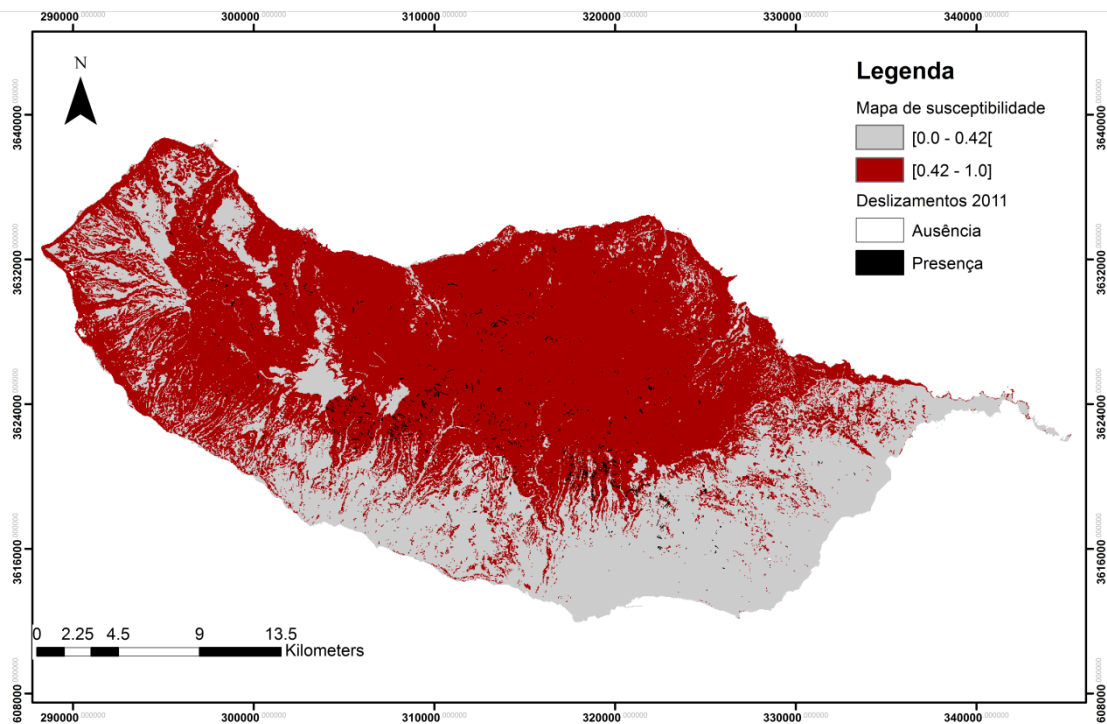


Figura 16 - Mapa de suscetibilidade binário com sobreposição das cicatrizes de 2011 (células a preto). Vermelho: células suscetíveis a deslizamentos (probabilidade superior a 0.42). Cinzento: células não suscetíveis a deslizamentos (probabilidade inferior a 0.42).

Quadro 7 - Células corretamente classificadas (células ativas – suscetíveis, células não ativas – não suscetíveis) e incorretamente classificadas (células ativas – não suscetíveis, células não ativas – suscetíveis) para as zonas da Ribeira Brava e Funchal (2008 e 2010) e ilha da Madeira (2011).

	Células ativas	Células não ativas	Cicatrizes	
Suscetível	71%	29%	Funchal	
Não suscetível	29%	71%		
Suscetível	36%	64%	Ribeira Brava	2010
Não suscetível	8%	92%		
Suscetível	52%	48%	Funchal + Ribeira Brava	
Não suscetível	16%	84%		
Suscetível	51%	49%	Funchal + Ribeira Brava	2008
Não suscetível	17%	83%		
Suscetível	38%	62%	Ilha da Madeira	2011
Não suscetível	15%	85%		

4.6 Limiares de intensidade e duração da precipitação

Da inventariação de eventos de precipitação resultaram 74 registos entre o período de janeiro de 2002 a novembro de 2014. Após, e com base nos nesses eventos, definiu-se o critério para um evento de precipitação que pode potencialmente desencadear a ocorrência de deslizamentos. Para o caso particular da ilha da Madeira estabeleceu-se o valor de precipitação horária igual ou superior a 8 mm e o seu fim sempre que decorram 24 horas de precipitação igual a zero.

Através de uma rotina em Matlab e utilizando a estação do Areeiro como referência para a ilha da Madeira, identificaram-se os eventos de precipitação de acordo com o critério estabelecido. Observaram-se 136 eventos de precipitação, dos quais, 22 possuem registo histórico de ocorrência de movimentos de massa.

Com os dados de intensidade e duração de precipitação dos 136 eventos (114 sem deslizamentos e 22 com deslizamentos associados) definiram-se áreas com diferentes frequências de ocorrência de deslizamentos (Quadro 8). Da classe 1 para a 4 aumenta a frequência de eventos associados a deslizamentos e contrariamente diminui a frequência de eventos sem deslizamentos (Figura 17).

As quatro classes são limitadas por 2 fronteiras verticais e 3 curvas de limiares de intensidade-duração de precipitação:

- Fronteiras verticais:
- Duração = 6
- Duração = 24
- Limiares:
- Intensidade = $6 \times \text{Duração}^{-0.44}$
- Intensidade = $21 \times \text{Duração}^{-0.44}$
- Intensidade = $32 \times \text{Duração}^{-0.44}$

Quadro 8 - Número de células com presença/ausência de movimentos de massa por classe de intensidade e duração de precipitação.

C1			C2		
Evento	Nº	%	Evento	Nº	%
Com deslizamento	0	0	Com deslizamento	7	15%
Sem deslizamento	63	100	Sem deslizamento	41	85%

C3		
Evento	Nº	%
Com deslizamento	9	50
Sem deslizamento	9	50

C4		
Evento	Nº	%
Com deslizamento	6	86
Sem deslizamento	1	14

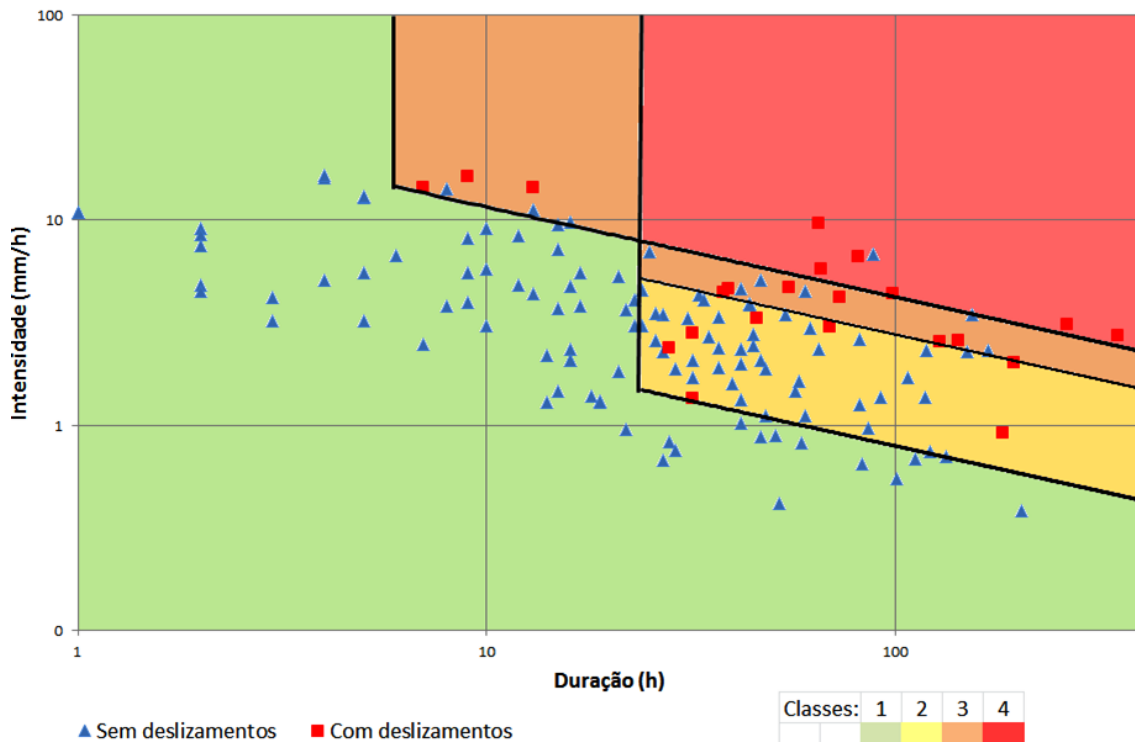


Figura 17 - Gráfico de intensidade e duração de eventos (precipitação horária superior a 8mm) e divisão por cores das 4 classes.

A matriz níveis de aviso à ocorrência de movimentos de massa reúne a informação adquirida dos fatores condicionantes (modelo de suscetibilidade) e dos fatores desencadeantes (classes de intensidade e duração de precipitação) e define diferentes níveis de aviso dependentes da probabilidade de ocorrência de movimentos de massa desencadeados por um evento de precipitação (Quadro 9).

A primeira etapa consistiu na transformação do mapa de suscetibilidade igualmente em quatro classes (Figura 18):

- Classe 1: suscetibilidade inferior ou igual a 0.1
- Classe 2: suscetibilidade superior a 0.1 e inferior ou igual a 0.4
- Classe 3: suscetibilidade superior a 0.4 e inferior ou igual a 0.6
- Classe 4: suscetibilidade superior a 0.6

Na segunda etapa, calcularam-se os valores de precipitação média horária de 24 estações e postos meteorológicos, para o intervalo de tempo do evento extremo de 20 de fevereiro de 2010. Este evento teve início às 4 horas de dia 20 de fevereiro de 2010 e terminou às 21 horas de dia 22 de fevereiro de 2010, totalizando 65 horas de duração. Com base nestes dados, estimou-se por krigagem ordinária, a precipitação média horária para a zona do Funchal e Ribeira Brava (Figura 19). Posteriormente classificou-se cada célula segundo as quatro classes de intensidade e duração de precipitação (Figura 20).

A terceira etapa consistiu na definição de níveis de aviso cruzando as classes de suscetibilidade com as classes de intensidade-duração de precipitação. Estes dois conjuntos de dados encontram-se numa resolução de 40 por 40 metros. Aplicando a matriz apresentada na Quadro 9, definiram-se diferentes níveis. Posteriormente reduziu-se a resolução da informação para uma malha de 400 por 400 metros, onde cada célula tomou o valor de maior frequência. Esse valor é então considerado o nível de aviso emitido à escala de 400 por 400 metros e reflete o grau de probabilidade de ocorrência de movimentos de massa na respetiva área. O esquema da metodologia desenvolvida encontra-se representado na Figura 21.

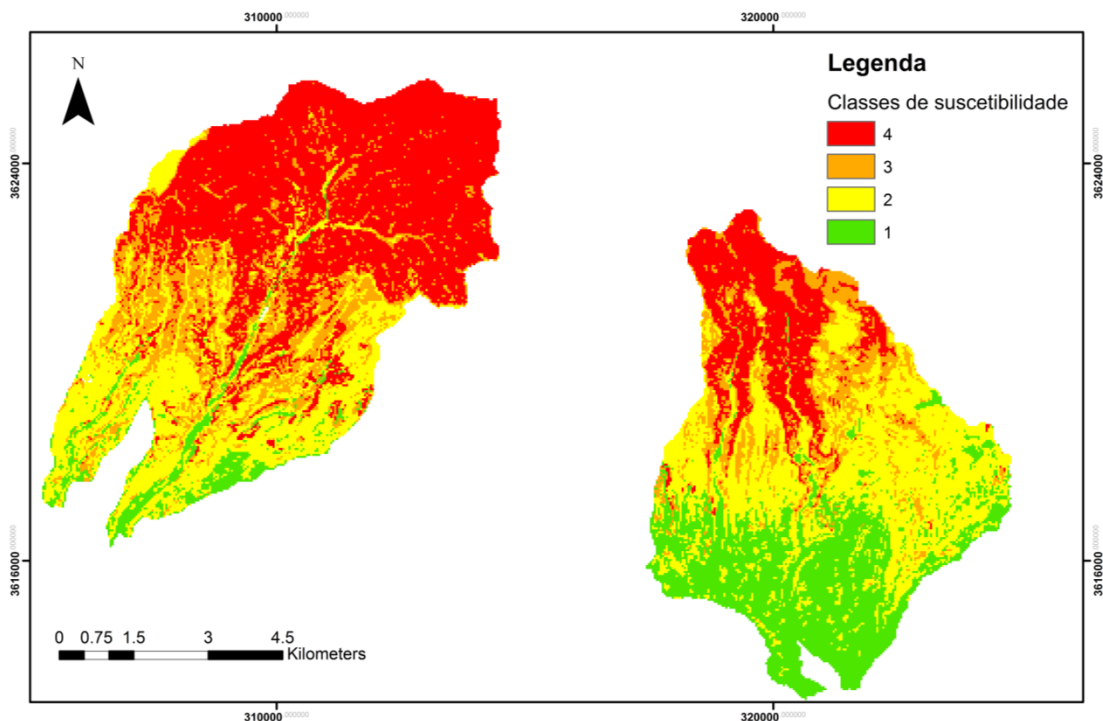


Figura 18: Mapa de classes de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa para as zonas da Ribeira Brava e Funchal (resolução 40 por 40 metros).

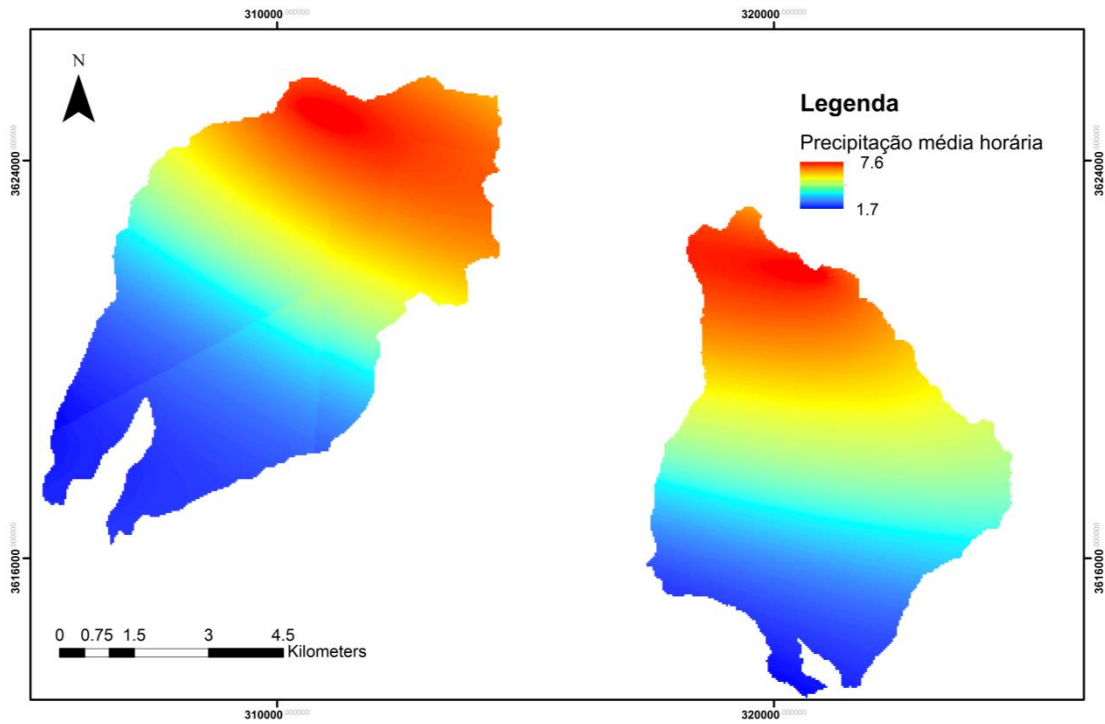


Figura 19: Mapa da precipitação média horária para as zonas da Ribeira Brava e Funchal, estimado por krigagem ordinária, para o período de duração do evento que se iniciou em 20 de Fevereiro de 2010.

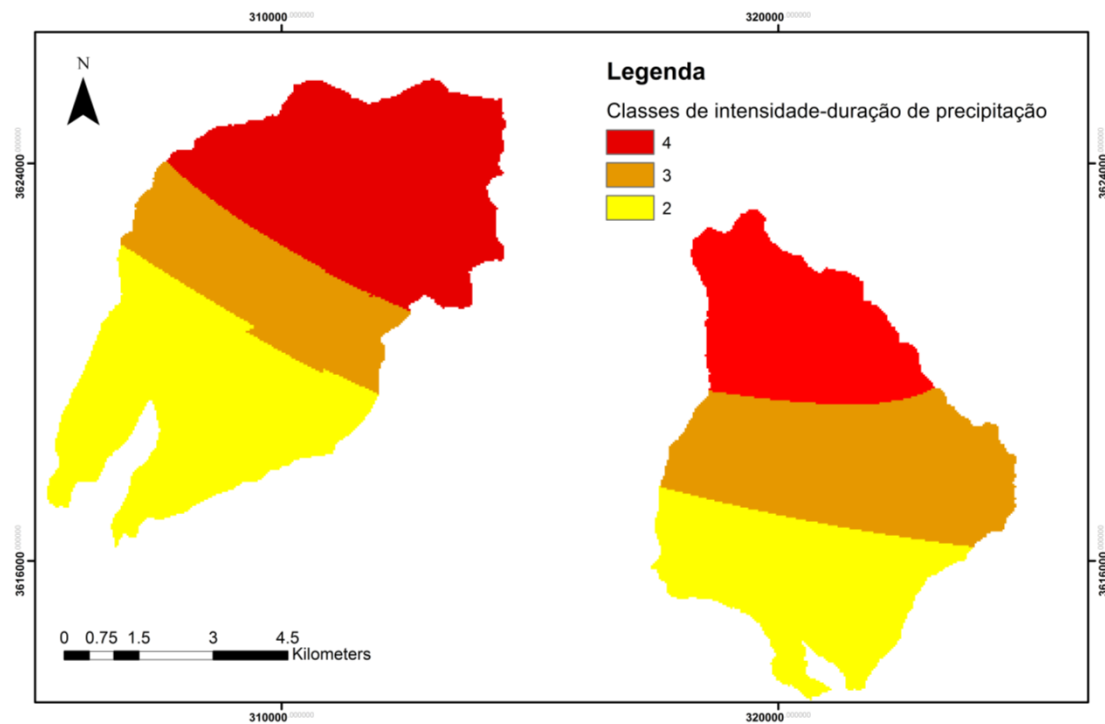


Figura 20: Mapa de classes de intensidade-duração de precipitação para as zonas da Ribeira Brava e Funchal, definidas para o período de duração do evento que se iniciou em 20 de Fevereiro de 2010.

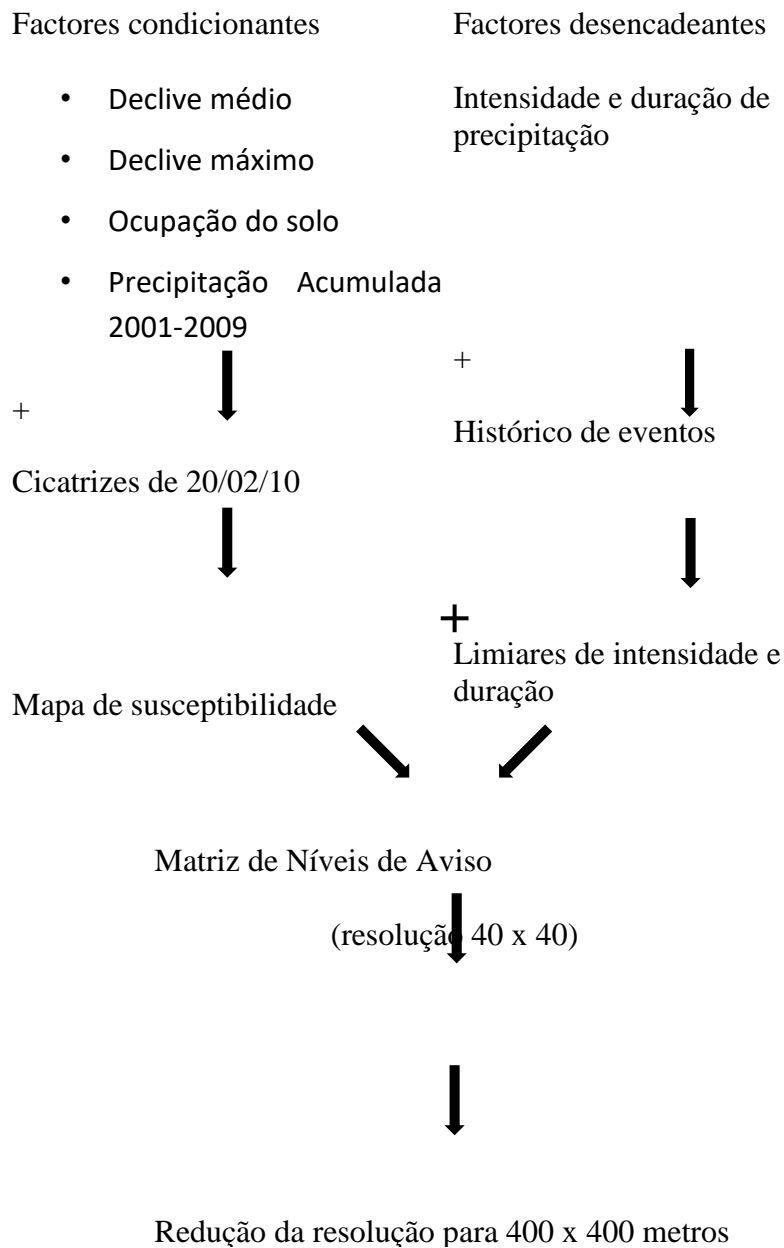


Figura 21: Esquema da metodologia desenvolvida para a definição do nível de aviso.

Quadro 9: Matriz de níveis de aviso à ocorrência de movimentos de massa.

		Precipitação			
		C1	C2	C3	C4
Suscetibilidade	C1	1	1	1	2
	C2	1	1	2	3
	C3	1	2	3	3
	C4	1	2	3	4

O mapa de níveis de aviso para o evento de 20 de Fevereiro de 2010 é apresentado na Figura 22. A frequência de células ativas e não ativas em cada nível de aviso é apresentada na Quadro 10. A interpretação dos níveis de aviso deve ser a seguinte:

Classe	Considerações
1	Nula a baixa probabilidade de ocorrência de movimentos de massa
2	Baixa a média probabilidade de ocorrência de movimentos de massa
3	Média a elevada probabilidade de ocorrência de movimentos de massa
4	Elevada a extrema probabilidade de ocorrência de movimentos de massa

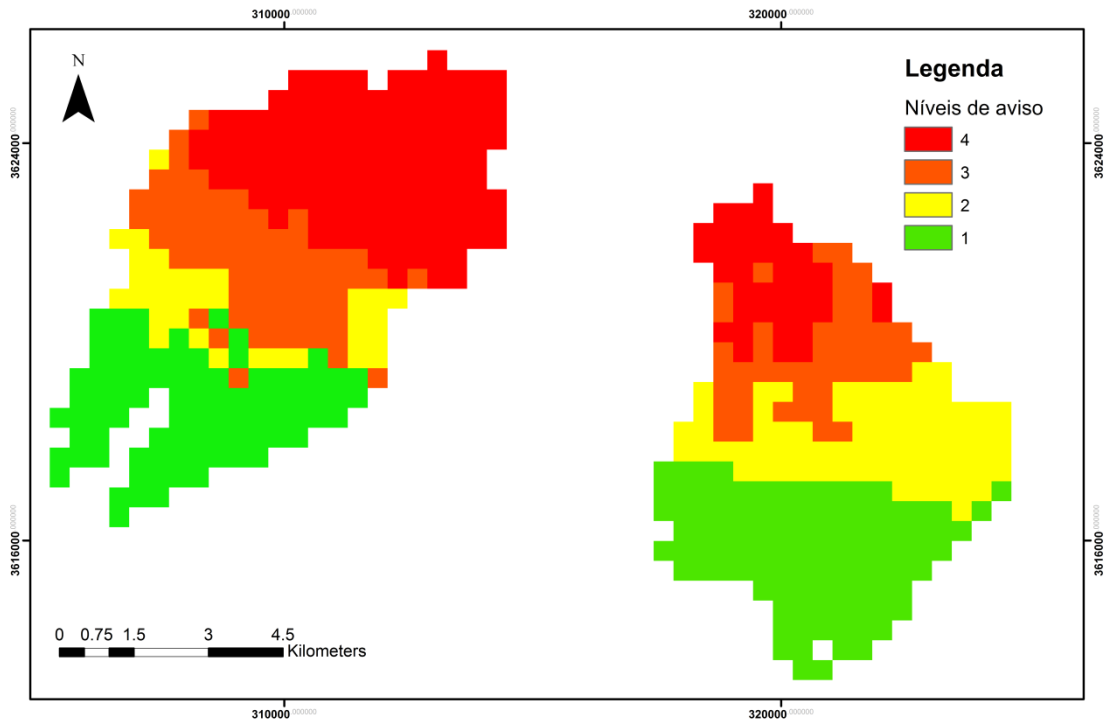


Figura 22: Níveis de aviso definidos para as condições de precipitação do evento de 20 de Fevereiro de 2010 na região da Ribeira Brava e Funchal.

Quadro 10: Frequência de células ativas (com deslizamentos) e não ativas (sem deslizamentos) distribuídas pelos níveis de aviso definidos para o evento de 20 de Fevereiro de 2010.

Níveis de Aviso	1	2	3	4
Células ativas (%)	29	39	47	61
Células não ativas (%)	71	61	53	39

4.7 Incerteza na modelação

A incerteza pode ser definida como um parâmetro associado a cada valor estimado que caracteriza a dispersão de valores que poderiam ter sido atribuídos a esse mesmo valor. Essa distribuição deve-se ao conhecimento limitado de um qualquer fenómeno, processo ou variável que se pretende estimar e deste modo também se pode definir a incerteza como uma medida de qualidade, quanto menor a incerteza, mais robusto é o modelo e logo os dados estimados. Sendo que um valor estimado sem incerteza associada será sempre um valor pouco fiável.

Existem várias fontes de incerteza e a sua relevância é dependente do tipo e abordagem que se pretende podendo estar relacionada com interpretação e processamento de dados, erros de medição, incerteza geológica, etc.

Na modelação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa, uma fonte de incerteza é proveniente da variável precipitação acumulada entre 2001 e 2009. Esta variável foi simulada com base em 18 postos e estações distribuídos pela ilha da Madeira, ou seja, com base em 18 dados locais realizou-se uma extrapolação para toda a área da ilha da Madeira.

Na Figura 23 apresenta-se o mapa de variância obtido das cem simulações realizadas para a variável “Precipitação acumulada entre 2001 e 2009”. Observa-se que as zonas de menor incerteza correspondem às áreas envolventes dos locais amostrados (postos e estações).

Outra fonte de incerteza é aquela resultante do ajustamento dos coeficientes dos parâmetros do modelo de regressão logística (declive médio, declive mínimo, ocupação do solo, precipitação acumulada entre 2001-2009) sempre que se constrói um novo modelo com uma das cem simulações de precipitação acumulada. Na Figura 24 está representado o mapa da variância dos 100 modelos de suscetibilidade.

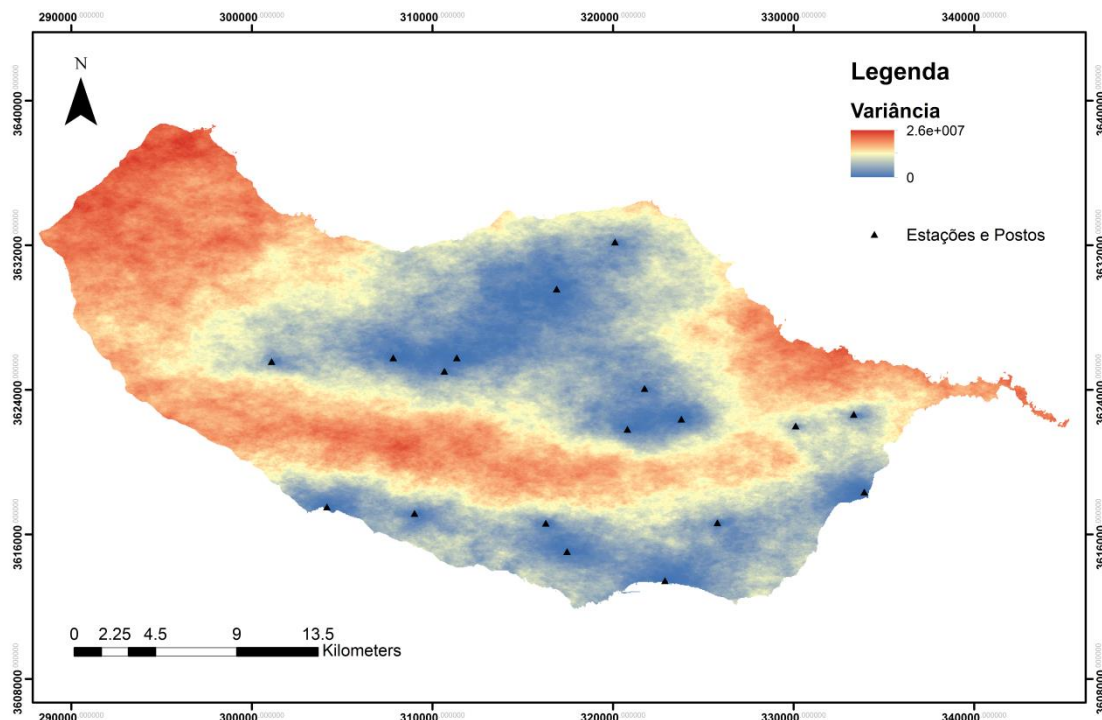


Figura 23 - Mapa da variância obtido das cem simulações da variável precipitação acumulada entre 2001-2009.

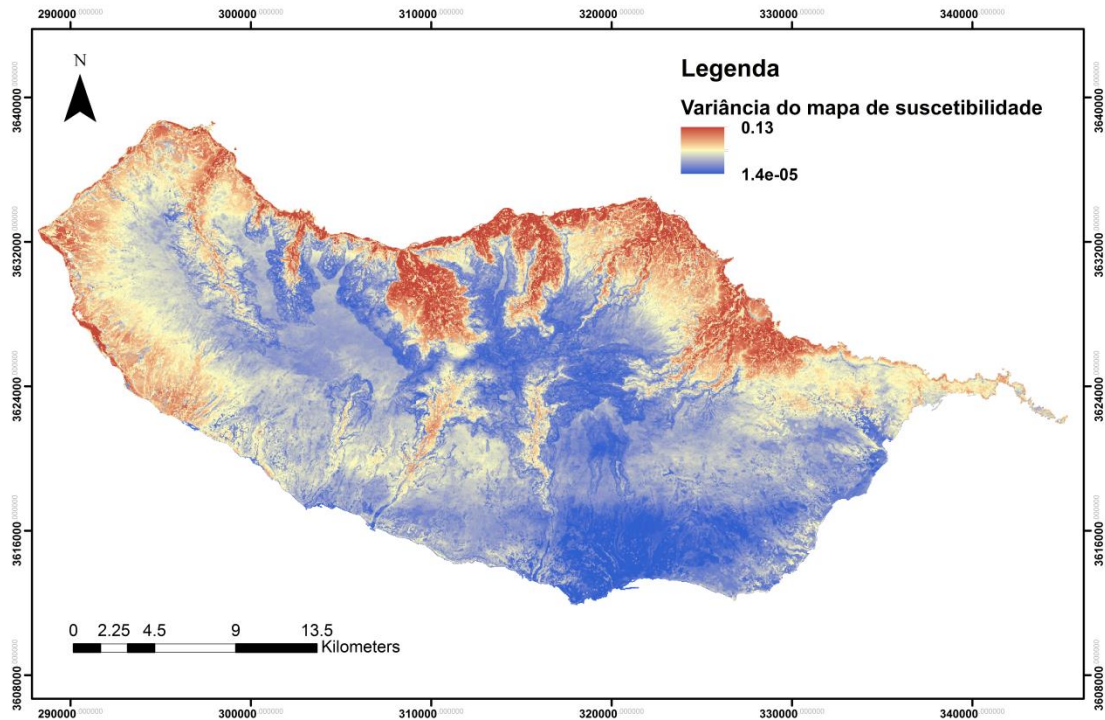


Figura 24 - Mapa de variância obtido dos cem modelos de suscetibilidade.

5 Erosão específica

5.1 Tipos de erosão hídrica

A erosão hídrica inclui os processos de desagregação e transporte de material sólido (sedimentos) com origem nos solos e rochas da litosfera que abrangem diversas fases: meteorização das rochas superficiais; desagregação dos solos e das rochas superficiais; destacamento do material superficial, pelos agentes erosivos (maioritariamente precipitação e escoamento); transporte dos sedimentos erodidos (no espaço interfluvial e rede de drenagem), pelo escoamento superficial; deposição de sedimentos (na rede de drenagem ou em meio recetor); e a consolidação de sedimentos, nos meios recetores.

Três tipos de erosão hídrica no espaço interfluvial contribuem para o material sólido das aluviões:

- Erosão distribuída - provocada por escoamento distribuído sobre o terreno, em encostas e bacias de receção;
- Erosão localizada - resultante de escoamento concentrado, que provoca sulcos, ravinas ou incisão de canais incipientes;
- Mobilização e transporte de sedimentos - provenientes de movimentos de vertente ou de massa, pelo escoamento distribuído ou concentrado.

A erosão espacialmente distribuída no espaço interfluvial, não associada a escoamentos concentrados, designa-se por erosão distribuída ou laminar sendo este o caso abordado no presente trabalho. Designa-se, também, por erosão específica por ser habitualmente quantificada em volume ou peso por unidade de área e para uma duração unitária (ano).

Para estabelecer as cartas de perda de solo e da distribuição dos níveis de ameaça de erosão, para a totalidade do território da ilha da Madeira, adotou-se a metodologia de Wischmeier, com os aperfeiçoamentos introduzidos pela RUSLE. Esta metodologia permite também obter os seguintes produtos intermédios:

- A carta de erosividade de precipitação, na ilha após produção das cartas de precipitação anual média e do Índice Modificado de Fournier;
- A carta de erodibilidade dos solos através da análise da tipologia dos diversos solos existentes na carta de solos da ilha da Madeira;
- A carta do factor LS para a ilha da Madeira sendo necessário previamente produzir as cartas de declives da ilha, densidade de drenagem e comprimento de encosta;
- A identificação e localização das zonas de terraços e socacos.

Devido ao número reduzido de estações meteorológicas com dados de precipitação subdiária e subhorária, a erosividade da precipitação foi obtida através de equações de correlação entre o Índice Modificado de Fournier (IMF) e o parâmetro de Wischmeier (R), para a estação do Funchal, para postos do sul de Portugal e através de relações disponíveis na literatura.

5.2 Metodologia de análise

5.2.1 Modelação e estimativa da erosão distribuída

5.2.1.1 Aspectos gerais

Os processos de erosão hídrica são de extrema complexidade, devido á quantidade de parâmetros e condições intervenientes. Na 1ª fase do EARAM dedicou-se uma pormenorizada atenção aos aspetos de caracterização da área em estudo e às particularidades do fenómeno. A área geográfica abrangida incluía as bacias hidrográficas de cinco ribeiras da vertente sul da Ilha da Madeira: Ribeira da Tabua, Ribeira Brava, São João, Santa Luzia e João Gomes (Figura 25; Figura 26).

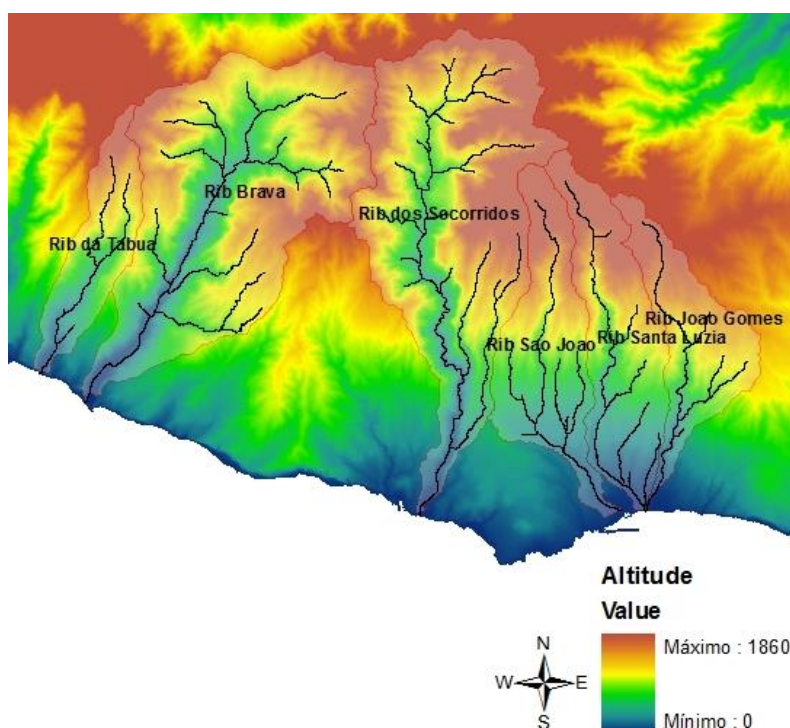


Figura 25 - Pormenor da localização das bacias hidrográficas objeto de estudo e da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos.

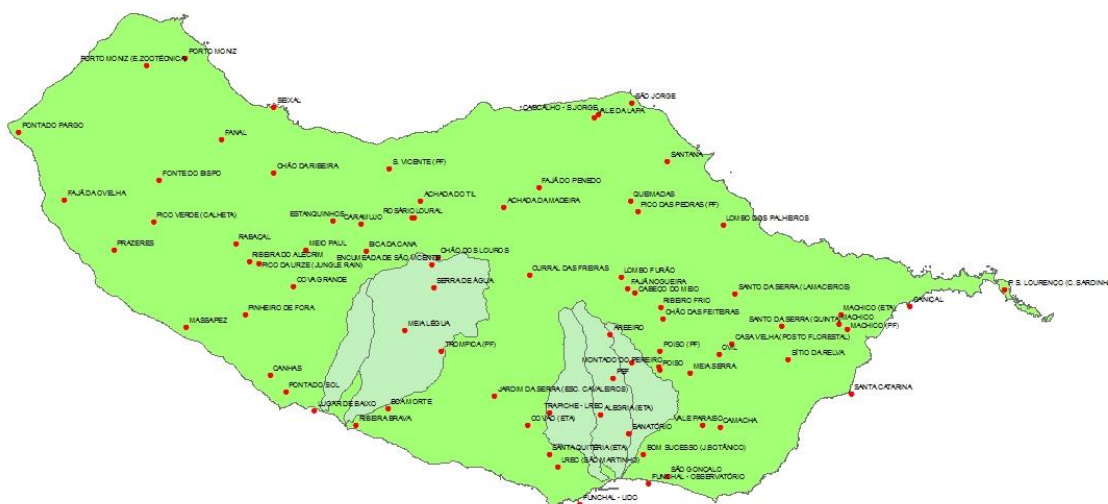


Figura 26 - Distribuição espacial das estações de monitorização existentes na Madeira.

A modelação e a estimativa da erosão distribuída ou perda sedimentos nos solos e rochas do espaço interfluvial dependem de múltiplos e variados fatores. A descrição dos mecanismos da erosão distribuída e o respetivo modelo de cálculo encontram-se desenvolvidos pormenorizadamente no Relatório Base da 1ª fase do EARAM (IST/UMa/LREC, 2010) e na nota técnica NTC1-4 desta fase.

É habitual considerar o modelo da Equação Universal da Perda de Solo - EUPS (Universal Soil Loss Equation - USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith em 1965, para descrever os principais parâmetros intervenientes no processo erosivo. Apesar de tecnologicamente a modelação e previsão da erosão ter evoluído bastante este modelo continua a garantir aproximações adequadas ao planeamento e a estas escalas de abordagem desde que sejam tomadas em consideração as atualizações sugeridas em 1978 e outras adaptações introduzidas pelo formalismo da Equação Universal da Perda de Solo Revista- EUPSR (Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE).

Na USLE/RUSLE cada parâmetro do processo erosivo é traduzido por um fator e do produto dos fatores obtém-se a estimativa de perda de solo. Estes fatores compreendem: parâmetros climáticos e hidrológicos que constituem as componentes ativas do processo erosivo; elementos relativos à vulnerabilidade dos solos e rochas da superfície, perante a ação dos agentes erosivos; e, parâmetros relativos ao meio, que traduzem o efeito de amplificação ou atenuação dos processos devido a características morfológicas dos terrenos e ao uso e ocupação dos solos.

A equação do modelo de Wischmeier é representada pela expressão seguinte:

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

em que:

- E - Valor estimado da perda de solo ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$);
- R - Fator de erosividade da chuva ($MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$);
- K - Fator de erodibilidade do solo ($t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot ano^{-1}$);
- LS - Fator fisiográfico (-);
- C - Fator do coberto vegetal (-);
- P - Fator de prática agrícola ou de medidas de proteção (-).

5.2.1.2 Erosividade da precipitação

O cálculo do fator de erosividade da precipitação é relativamente complexo e carece de registos udográficos de grande precisão. Para uma dada duração, o valor da erosividade corresponde à soma dos valores de erosividade $E_{l_{30}}$, para todas as chuvadas que ocorrem durante esse período. A duração habitual para os períodos analisados é de um ano. O valor do índice $E_{l_{30}}$, para cada acontecimento pluvioso, é obtido pelo produto da energia cinética total da precipitação pela máxima intensidade da precipitação com a duração de 30 minutos.

O valor da erosividade, para uma dada duração, corresponde à soma dos valores de erosividade $E_{l_{30}}$, para o conjunto das chuvadas que ocorrem durante esse período. A duração habitual dos períodos analisados é de um ano. De acordo com a metodologia, só são considerados os acontecimentos chuvosos (chuvadas) de valor superior a 12,5 mm em que não existam intervalos de mais de seis horas sem precipitação, a não ser que pelo menos 6,5 mm ocorram em 15 minutos (Wischmeier e Smith, 1978)

O valor do índice $E_{l_{30}}$, correspondente a cada chuvada, é obtido pelo produto da energia cinética total da precipitação da chuvada, calculada incrementalmente, pela máxima intensidade da precipitação com a duração de 30 minutos, observada durante a chuvada. É expresso em $MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot ha^{-1}$, por acontecimento, ou em $MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ para o conjunto das chuvadas anuais.

A erosividade da precipitação - R_i - para uma dada duração, i , de um conjunto de acontecimentos chuvosos (chuvadas - j), em $MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot ha^{-1}$, obtêm-se por aplicação da expressão:

$$R_i = \sum_{j=1}^m E \cdot l_{30_j}$$

Onde, para cada acontecimento chuvoso (chuvada – j) o valor do índice -- EI_{30j} - é obtido do produto da energia cinética total da precipitação pela máxima intensidade da precipitação com a duração de 30 minutos, observada no decorrer da chuvada.

De acordo com a precipitação de Wischmeier, o acontecimento erosivo teve início no dia 20 de fevereiro às 03:00 h e terminou às 23:10 h, desse mesmo dia. A precipitação total foi de 147 mm com uma intensidade média máxima em 30 minutos, $I_{30} \approx 62,8 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

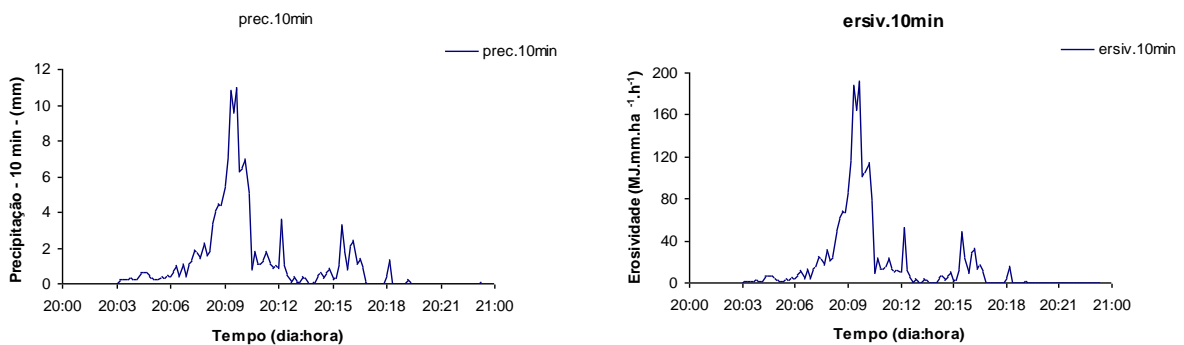


Figura 27 a) Hietograma da precipitação (Wischmeier) para o dia 20 de Fevereiro; b) Histograma da erosividade da precipitação (Wischmeier) para o dia 20 de Fevereiro.

Como se pode observar nas figuras anteriores, mais de 98 % da erosividade ocorreu até cerca das 17:00 h, mais de 85% até cerca das 13:00 h e 76,8% até às 11:00 h. A erosividade total resultou do somatório das energias cinéticas, correspondentes aos incrementos de precipitação (de 10 min), multiplicado pelo valor da intensidade máxima em 30 min, tendo-se obtido a erosividade, para o acontecimento $R = 2\,145 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Nesta fase do estudo não foi possível apurar com rigor, o valor da erosividade média anual da precipitação para a zona abrangida pelos estudos, mas, baseado em estudos anteriores realizados para a ilha da Madeira e noutros valores disponíveis para Portugal (Coutinho et al, 1994), com correlações estabelecidas entre a erosividade média da precipitação e o Índice de Fournier modificado, considerou-se o valor médio anual $R \approx 3\,000 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$.

5.2.1.3 Restantes fatores da EUPS/RUSLE

Para determinar outros fatores de esta relação seguiu-se metodologia habitual (ver descrições pormenorizadas no Relatório Base da 1ª fase do EARAM (IST/UMa/LREC, 2010) e na nota técnica NTC1-4 desta fase.).

5.2.2 Ameaça da erosão hídrica

5.2.2.1 *Aspetos introdutórios*

Para produzir as cartas de perda de solo e da distribuição dos níveis de ameaça de erosão, para a totalidade do território da ilha da Madeira, foi decidido aplicar a metodologia de Wischmeier, com os aperfeiçoamentos introduzidos pela RUSLE, obtendo-se em etapas intermédias:

- A carta de erosividade de precipitação, na ilha após produção das cartas de precipitação anual média e do Índice Modificado de Fournier;
- A carta de erodibilidade dos solos através da análise da tipologia dos diversos solos existentes na carta de solos da ilha da Madeira;
- A carta do factor LS para a ilha da Madeira sendo necessário previamente produzir as cartas de declives da ilha, densidade de drenagem e comprimento de encosta;
- A identificação dos tipos de ocupação e uso do solo e a localização das zonas de terraços e socacos.

Devido ao número reduzido de estações meteorológicas com dados de precipitação subdiária e subhorária, a erosividade da precipitação foi obtida através de equações de correlação entre o Índice Modificado de Fournier (IMF) e o parâmetro de Wischmeier (R), para a estação do Funchal, para postos do sul de Portugal e através de relações disponíveis na literatura.

Com recurso à aplicação da técnica de cokrigagem, obteve-se a distribuição do IMF para toda a área da ilha da Madeira o que permitiu elaborar posteriormente cartas de erosividade da precipitação. A equação obtida para a erosividade (equação 4.3), permitiu estabelecer a cartografia da erosividade da precipitação.

$$R_2' = 1.365 \times IMF^{1.408} \quad (4.3)$$

Em que:

R_2, R_2', R_3 - Erosividade média anual (MJ. mm. h⁻¹. ha⁻¹. ano⁻¹);

IMF – Índice Modificado de Fournier.

Os outros parâmetros do modelo estão descritos em pormenor na NT C1-C4.

5.2.2.2 *Ameaça da erosão do solo “in situ”*

Tomando como referência o estudo recentemente realizado para a ilha da Sicília sobre risco de erosão do solo (Fantappiè, Priori, & Costantini, 2014) considerou-se pertinente a abordagem, realizada em contexto muito semelhante do caso da ilha da Madeira, que resulta em estimar o número de anos para que ocorra a exaustão do recurso edáfico - solo de cobertura; designa-se esta qualidade como **ameaça da erosão do solo**.

Nos termos da referência citada, adotaram-se as seguintes classes de nível de ameaça de erosão: a) **baixa** - necessários mais de 500 anos para que ocorra a erosão completa; b) **moderada** - o tempo para erosão completa varia entre os 100 e 500 anos; c) **alta** - considerando que a exaustão do solo ocorre entre 10 e 100 anos; d) **muito alta** - quando, no máximo, em cerca de 10 anos se observa a erosão completa do solo de cobertura, representando esta a situação de ameaça mais preocupante. Foi adotado para o peso volúmico aparente do solo 1.7 t.m^{-3} . Considerando este valor, a distribuição superficial da erosão hídrica e os valores de espessura do solo de cobertura, estimaram-se os anos para a perda total do solo e definiram-se os distintos níveis de ameaça da erosão hídrica.

5.3 Principais resultados

5.3.1 Resultados da primeira fase

Na primeira fase do EARAM obtiveram-se as seguintes estimativas para a região do Funchal.

Erosividade da precipitação – Para a erosividade no dia 20 de Fevereiro, calculada de acordo com Wischmeier, resultou, para o posto do Funchal, o valor $R = 2145 \text{ MJ.mm.h}^{-1}.\text{ha}^{-1}$. Para as bacias abrangidas nos estudos, o valor médio anual foi de $R = 3000 \text{ MJ.mm.h}^{-1}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

Erodibilidade dos solos - Os valores estimados levaram à adoção de $K = 0,02 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, para valor médio nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal, da Tabua e Ribeira Brava.

Fator fisiográfico - Em termos médios, nesta fase do estudo, para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal, foram adotados: comprimento médio das encostas, $\lambda_e \approx 150 \text{ m}$ e declive médio $i \approx 25\%$, tendo resultado o valor $LS = 15,0$.

Fator de cultura e de uso e fator de prática agrícola - Atendendo à complexidade de usos agrícola, florestal e ocupação urbana adotaram-se, respetivamente, para o ano médio e para o dia 20 de fevereiro os valores $CP = 0,05$ e $CP = 0,08$.

Estimativas de valores de erosão hídrica distribuída – Considerando as estimativas dos fatores acima referidos, os valores de erosão estimados, respetivamente, em período médio e para o dia 20 de fevereiro:

Em ano médio - $E \approx 45,0 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (ou $2600 \text{ m}^3.\text{km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$).

No dia 20 de Fevereiro de 2010 - $E \approx 65,0 \text{ t.ha}^{-1}$ (ou $3750 \text{ m}^3.\text{km}^{-2}$).

Quantificação da Produção de sedimentos - Foram estimados os valores do coeficiente de produção de sedimentos para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal. As três principais bacias do concelho do Funchal têm uma área de aproximadamente 40 km^2 .

Os valores dos coeficientes adotados foram, respetivamente, em período médio e para o dia 20 de fevereiro, $CP_s = 0,9$ e $CP_s = 1,0$.

Deste modo, para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal foram estimados os volumes de sedimentos produzidos, respetivamente, em período médio e para o dia 20 de fevereiro:

Em ano médio - $V_s \approx 71\,000\text{ m}^3\cdot\text{ano}^{-1}$.

No dia 20 de Fevereiro de 2010 - $V_s \approx 110\,000\text{ m}^3$.

Precisão das estimativas da erosão - Importa salientar, que face à complexidade dos processos erosivos e aos erros e incertezas associados à quantificação de cada um dos seus parâmetros e fatores, é necessário associar um fator às estimativas apresentadas. Na bibliografia são citados diversos intervalos de confiança situados, geralmente, ± 20 a 50% .

Os trabalhos desenvolvidos na 2ª fase do estudo vieram confirmaram, de modo geral, a conformidade e ordens de grandeza dos valores obtidos na 1ª fase.

5.3.2 Resultados da segunda fase

Na 2ª fase do trabalho (EARAM2), em que o principal objetivo consistia no estabelecimento dos valores da perda de solo e da distribuição dos níveis de ameaça de erosão, para a totalidade do território da ilha da Madeira foi necessário desenvolver etapas intermédias na aplicação da metodologia de Wischmeier, na linha desenvolvida para a 1ª fase do estudo. Seguidamente apresentam-se os elementos mais pertinentes que constam da nota técnica C1-4.

Erosividade da precipitação – Para o tratamento dos registos de precipitação foram considerados 32 postos meteorológicos para os quais se obtiveram os valores de precipitação anual média e valores de IMF estimados. Para cobrir a orla litoral e melhorar as condições de distribuição da precipitação foram considerados de postos fictícios com valores obtidos por interpolação, na carta de precipitação do PRAM (SRA & INAG, 2003). Os valores para os postos são os que constam do Quadro 2 - Precipitação anual média (mm) e Índice Modificado de Fournier para os postos considerados (Capítulos 4 e 5, nota técnica C1-4.).

Os mapas de distribuição da precipitação e do IMF resultaram da aplicação de uma técnica de cokrigagem, tendo-se obtido a carta de erosividade de precipitação da aplicação da expressão R_2' (Figura 5). A erosividade de precipitação apresenta valores compreendidos entre cerca de 661 e $8\,515\text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$. O valor médio de erosividade de precipitação para a ilha da Madeira é de cerca de $2\,960\text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$.

Erodibilidade dos solos - Os valores avaliados variam entre 0,0001 e 0,0192 t.h.MJ⁻¹mm⁻¹, registando-se um valor médio, para a ilha de cerca de $K \approx 0,008$ t.h.MJ⁻¹mm⁻¹ (NT C1-4, Figura 6).

Fator fisiográfico - O fator de comprimento de encosta L apresenta valores que variam entre 1,28 e 4,75. Relativamente ao fator de declive S, os valores variam entre 0,03 e 16,12. Do produto destes dois fatores, o fator fisiográfico (LS) obtido para toda a área da ilha da Madeira apresenta o valor máximo de cerca de 76,4 e o valor médio de 22,7 (NT C1-4, Figura 7).

Fator de cultura e de uso e fator de prática agrícola – Os valores do fator de coberto vegetal C atribuído, variam consoante as diferentes classes de uso e ocupação do solo, entre 0.001 e 0.35, apresentando o valor médio de cerca de $C \approx 0.05$ (Figura 8). O fator de prática agrícola P apresenta os valores de 1,0, para a generalidade do território e 0,1 no caso de ocupação em terraços; o valor médio de cerca de 0.98 (NT C1-4, Figura 9).

Estimativa de valores de erosão hídrica distribuída – O valor médio de erosão hídrica obtido para a ilha da Madeira é de cerca de $E \approx 28$ t.ha⁻¹.ano⁻¹, com o valor máximo de aproximadamente 920 t.ha⁻¹.ano⁻¹; na zona central da ilha, bem como em áreas localizadas junto à costa (em menor extensão), encontram-se os valores mais elevados de perda de solo. Em zonas populacionais, caso do Funchal e de outros núcleos urbanos, os valores de erosão hídrica são relativamente baixos. Na Figura seguinte (NT C1-4, Figura 10) apresenta-se a carta de distribuição da erosão hídrica na ilha da Madeira.

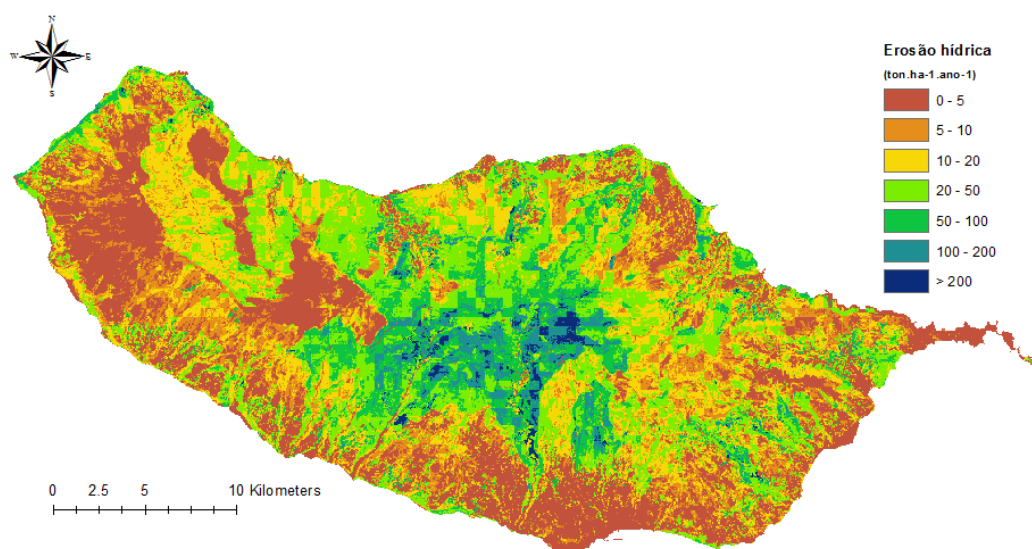


Figura 28 - Carta da erosão hídrica (E) para a ilha da Madeira.

Ameaça da erosão hídrica – Da aplicação da metodologia adotada observou-se que o tempo médio estimado para a total exaustão do recurso edáfico é de aproximadamente 21 727 anos. Verificou-se se significativa a área que corresponde aos níveis de ameaça

muito alta e alta; confirma-se que zonas com declives relativamente elevados têm associado níveis de ameaça de erosão hídrica alta (ou muito alta). A ameaça muito alta e alta corresponde a $\approx 263 \text{ km}^2$ (35,6 %) e, para muito alta, a área é $\approx 40 \text{ km}^2$ (5,4 %).

Na Figura 29 apresenta-se a carta de distribuição da erosão hídrica na ilha da Madeira. Observa-se que, em grande medida, as áreas de maior ameaça de erosão correspondem às áreas mais atingidas pela catástrofe de 20 de fevereiro de 2010.

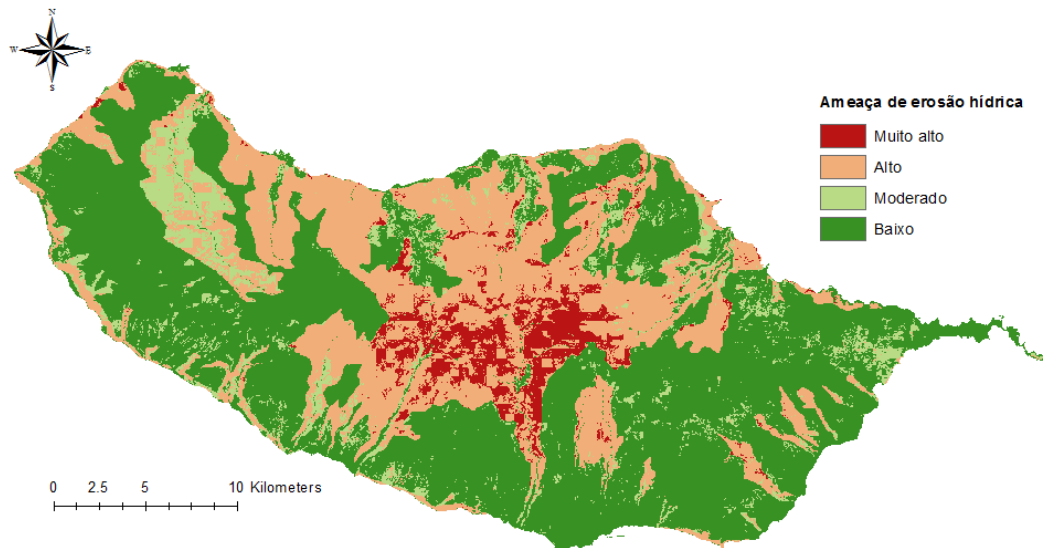


Figura 29 - Ameaça de erosão hídrica na ilha da Madeira

6 Utilização de ferramentas de simulação matemática para a análise de risco de aluviões

6.1 Enquadramento e objetivos

As aluviões são escoamentos bifásicos, de água e de material granular sólido de diferentes diâmetros, com elevadas concentrações de material sólido e com elevado potencial geomórfico, i.e. com elevada capacidade de alterar, em períodos curtos, a morfologia dos vales em que se propaga. Na ilha da Madeira, as aluviões constituem um fenómeno natural, associado a um risco potencial significativo e permanente para os respetivos habitantes.

As medidas de mitigação do impacto de aluviões raramente compreendem a eliminação do fenómeno, procurando, mais frequentemente, reduzir a exposição ou a vulnerabilidade. Para planear as medidas de mitigação há que definir a aluvião de projeto e, para essa aluvião, há que quantificar a severidade da ação, aqui entendida como combinação de exposição e vulnerabilidade. A simulação matemática da propagação de aluviões é, neste contexto, uma ferramenta fundamental para o mapeamento da exposição e para a quantificação da severidade.

No âmbito do projeto de investigação CENOR, Norvia (2105) o modelo hidrodinâmico e morfológico bidimensional (em planta) STAV2D (Strong Transients in Alluvial Valleys, desenvolvido pelo CERIS-IST) foi calibrado e validado para ser aplicado nas vertentes sul e leste da ilha da Madeira. Recorrendo a este modelo pretende-se, neste capítulo, proceder a recomendações práticas sobre a forma como as ferramentas de simulação matemática devem ser utilizadas para apoiar estudos de intervenção nas ribeiras da Madeira.

Para avaliar a severidade de uma aluvião numa bacia hidrográfica genérica há que: i) definir o período de retorno da precipitação que desencadeia a aluvião; ii) determinar os hietogramas iii) quantificar a magnitude e a distribuição espacial das instabilizações de encosta, iv) simular de forma combinada a propagação de água e de material sólido, compreendendo a eventual interação do escoamento com o leito móvel das ribeiras e v) definir as zonas de elevada severidade, com base em critérios previamente definidos. Esta metodologia é aplicada às ribeiras do Funchal (São João, Santa Luzia e João Gomes) e para a ribeira do Machico, para uma precipitação cujo período de retorno é 100 anos (secção 6.3). Contrastam-se os resultados obtidos com esta metodologia com os obtidos por simulações simplificadas em que não se considera explicitamente o transporte de sedimentos e discutem-se as fragilidades das soluções propostas com base em abordagens simplificadas.

6.2 Ferramenta de modelação matemática: modelo STAV2D

O modelo conceptual no qual se baseiam o modelo de simulação STAV2D foi desenvolvido para o caso geral de escoamentos geomórficos estratificados que obedecem à hipótese de escoamento pouco profundo. A fase granular na camada de transporte é composta por grãos de sedimentos, quasi-elásticos, ligeiramente rugosos e aproximadamente esféricos, resultantes da erosão do fundo, da erosão de margens, da erosão das encostas ou de eventos de instabilização das encostas. O fluido é viscoso e incompressível. A reologia da camada de transporte é caracterizada por uma preponderância de tensões do tipo colisional e turbulenta. O modelo conceptual assim desenvolvido é também aplicável a escoamentos do tipo debris-flow e mud-flow (escoamento de lamas), isto é, a escoamentos de densas misturas de material granular e água, desde que se especifique que a camada de transporte ocupa a quase totalidade da profundidade do escoamento.

As equações de conservação da massa de água e de sedimentos e da quantidade de movimento da mistura são resolvidas com base em esquemas de discretização explícitos conservativos. O modelo permite conhecer, em cada instante até ao horizonte de cálculo, a distribuição espacial dos caudais sólidos de todas as fracções granulométricas bem como o caudal sólido total, o caudal líquido, as velocidades de propagação de sólidos e líquido e a morfologia das ribeiras.

O STAV2D pode ser utilizado como modelo hidrológico se a distribuição de precipitação na bacia hidrográfica for conhecida. Fornecendo ao modelo as zonas em que se libertam volumes de material sólido associados à instabilização de encostas, a propagação das massas de sedimentos e de água decorre das leis de conservação da hidrodinâmica e morfodinâmica, sem considerações adicionais ou simplificações. A formação de aluviões nas linhas de água em geral e nas ribeiras principais em particular, nomeadamente a distribuição temporal de caudais líquidos e sólidos, é, assim, resolvida pelos processos físicos incluídos no modelo e não imposta pelo utilizador.

O modelo STAV2D foi validado com base nos dados de caudais líquidos e sólidos do evento de 20 de Fevereiro de 2010. Na Figura 30 mostra-se o padrão de erosão/deposição ao longo das ribeiras e na Cidade do Funchal. Diferentes fórmulas de resistência ao escoamento resultam em diferentes padrões; todavia verificou-se que a fórmula de Ferreira et al. (2009) conduzia a padrões de deposição lateral que se encontram de acordo com o observado no local e descrito no relatório publicado pelo IST, UA e LREC (2010).

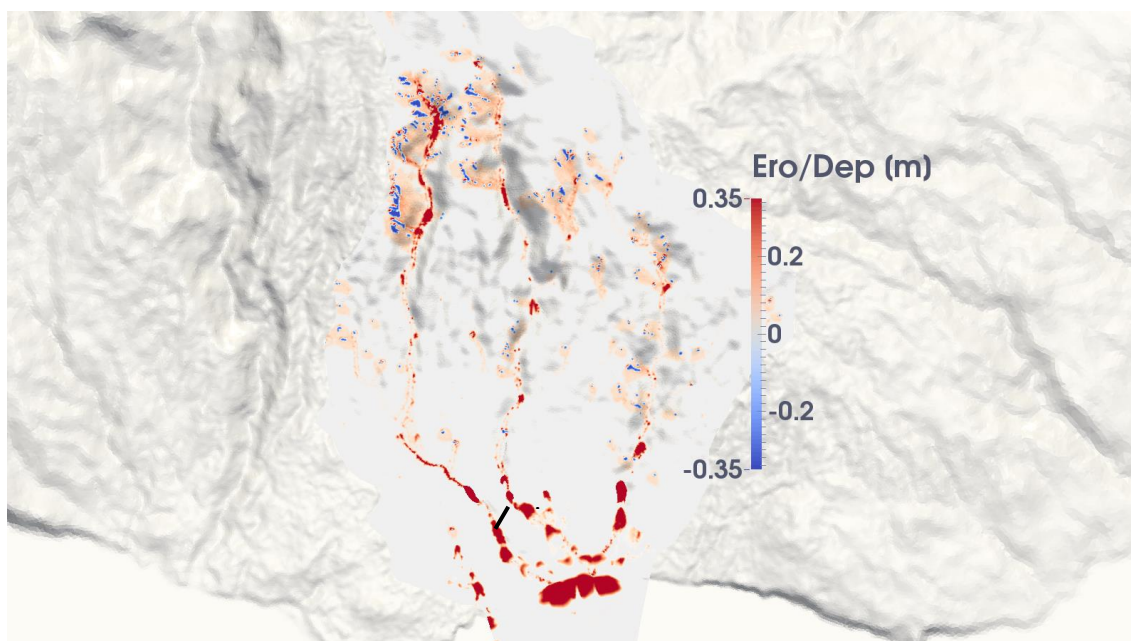


Figura 30 – Padrão final de erosão/deposição. Parâmetros: $D_{50}=2.0\text{mm}$, $C_{f_{\max}}=0.07$ (Ferreira et al., 2009).

As simulações efectuadas apontam para valores de material sólido depositado da ordem de 420000 m^3 para a bacia hidrográfica do Funchal, dos quais 113000 m^3 são depositados na Baixa do Funchal (Quadro 11).

Quadro 11 – Volumes de material sólido acumulados nas bacias hidrográficas das ribeiras afluentes ao Funchal, incluindo na baixa do Funchal

Zona de deposição	Volume depositado (m^3)
Ribeira/Sub-Bacia de Santa Luzia	135 000
Ribeira/Sub-Bacia de São João	225 000
Ribeira/Sub-Bacia de João Gomes	60 000
TOTAL	420 000
Baixa do Funchal	113 000

Estes valores são da ordem de grandeza das observações efectuadas no terreno, como descrito em Castro (2011) e Teixeira (2010). À semelhança do ocorrido em 20 de Fevereiro de 2010, os resultados mostram que as três ribeiras ficam completamente obstruídas por material sólido depositado. Mostra-se que a capacidade de vazão das ribeiras se anulou, passando o escoamento a processar-se pela malha urbana do Funchal, justificando a deposição de material sólido nas ruas da baixa do Funchal. Considera-se, assim, o modelo STAV2D validado para trabalhos nas ribeiras das encostas Sul da Ilha da Madeira.

6.3 Metodologia para Avaliação da severidade de aluviões nas bacias hidrográficas do Funchal e Machico

6.3.1 Introdução

Os passos fundamentais da metodologia são os seguintes: i) definição do período de retorno da precipitação que desencadeia a aluvião; ii) determinação dos hietogramas correspondentes e a sua distribuição espacial iii) quantificação da magnitude e a correspondente distribuição espacial das instabilizações geotécnicas de material sólido nas encostas, iv) simulação da propagação da mistura de água e material sólido que resulta da precipitação útil do material sólido proveniente das encostas e a eventual interação do escoamento com o leito móvel das ribeiras e v) a definição das zonas de elevada severidade, com base em critérios previamente definidos.

Aplica-se esta metodologia às ribeiras do Funchal (São João, Santa Luzia e João Gomes) e para a ribeira do Machico. Quanto ao passo i), considera-se o período de retorno de 100 anos. Com base nos valores das precipitações diárias máximas anuais publicadas no Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira - Fase 2, (IST, ADIST, UM 2015) e utilizando os quocientes medianos dos ratios sub-diários referentes às durações de 1h, 3h, 6h, 12h e 24h nas estações correspondentes a cada sub-bacia das zonas em estudo, foram derivados os respetivos hietogramas (passo ii).

A magnitude da produção de sedimentos por instabilização geotécnica nas encostas e a distribuição espacial das zonas sujeitas a instabilização (passo iii) constitui uma fonte relevante de incerteza. Na ausência de critérios baseados em parametrizações universais recomenda-se que sejam utilizadas as manchas de instabilização e os respetivos volumes determinados em EARAM para o evento de 20 de fevereiro de 2010.

O passo iv) da metodologia proposta corresponde à simulação matemática propriamente dita. O modelo SATAV2D propaga misturas de água e sedimentos se o leito for móvel e composto por sedimentos suscetíveis de serem incorporados no escoamento ou se forem introduzidos sedimentos nas fronteiras abertas. Neste caso, a modelação é feita à escala da bacia hidrográfica, pelo que não há fronteiras abertas. As condições iniciais compreendem leito móvel exceto nos trechos regularizados do Funchal e Machico. Os hietogramas são transformados em séries temporais de volumes de água em cada célula de cálculo. No instante correspondente ao pico dos hietogramas é libertado o volume de material sólido correspondente à instabilização geotécnica nas encostas. O material sólido depositado nas ribeiras pela aluvião anterior pode ser remobilizado pela aluvião seguinte. Esta característica é plenamente descrita pelo modelo STAV2D, bastando especificar a espessura e granulometria do material aluvionar nos leitos das ribeiras.

Para quantificar a severidade, no passo v), utiliza-se o critério de instabilização de pessoas sujeitas à ação de escoamentos, descrita em Karvonen et al. (2000) e Conde et al. (2015).

6.3.2 Simulações nas Ribeiras do Funchal

As bacias das Ribeiras de S. João, Santa Luzia e João Gomes compõem o domínio para as simulações das ribeiras do Funchal, apresentando uma área total de aproximadamente 40 km², com um declive médio de 55% e um tempo de concentração $t_c=0.6$ h. Devido à presença de estruturas no MDT que serviu de elemento de base, o troço regularizado foi manualmente corrigido de modo a reproduzir as condições do terreno. O domínio foi discretizado com uma resolução de 1.5 m ao longo do troço regularizado e com uma resolução de até 30 m nas restantes zonas, resultando em aproximadamente 550000 células de cálculo.

As simulações realizadas para a marcação da área afetada por uma cheia centenária tiveram como parâmetros de entrada os hietogramas de várias sub-bacias, como definidas no relatório IST, UA e LREC (2010). Não existindo um modelo de evapotranspiração, foi assumido um valor típico de 20% de perdas. De modo a considerar a mobilização de material das encostas devido a instabilização geotécnica considerou-se a estimativa de volumes de erosão por instabilização geotécnica descrito no relatório publicado pelo IST, UA e LREC (2010), referentes ao evento de 20 de Fevereiro de 2010. Admite-se que os escorregamentos ocorrem quando se regista o pico do hietograma. Pode ainda ocorrer erosão superficial nas encostas da bacia, por ação do escoamento superficial, bem como deposição de parte do material sólido que foi libertado nos deslizamentos de terra (especialmente em depressões do terreno). Às secções de referência chega, então, um volume de água e de material sólido cuja distribuição temporal configura os hidrogramas de caudais totais usados nas simulações do comportamento hidráulico das Ribeiras do Funchal.

Foram desenhados dois cenários, correspondendo aos casos sem (Cenário 1) e com deslizamentos e transporte sólido (Cenário 2), havendo assim a possibilidade de comparação com o cenário hidráulico sem considerações de transporte sólido de projeto. Na secção da foz de cada ribeira pode calculou-se o hidrograma, resultando nos caudais de ponta de cheia apresentados no Quadro 12.

Quadro 12 - Caudais de ponta de cheia, ribeiras do Funchal

Ribeira	Cenário 1 Caudal (m ³ s ⁻¹)	Cenário2 Caudal (m ³ s ⁻¹)
São João	300	1100
Sta. Luzia	260	630
João Gomes	160	250

É notório o aumento do caudal de ponta de cheia para o Cenário 2, correspondente a condições de transporte sólido nas ribeiras, resultantes da mobilidade do fundo e do transporte do volume de sedimentos resultante dos episódios de instabilização geotécnica. Este aumento do caudal de ponta de cheia, observável nas Figura 31, Figura 32 e Figura 33, não se deve apenas ao volume de material sólido inerente à aluvião. Trata-se de um aumento inerente aos escoamentos bifásicos (misturas de água e sedimentos) expresso frequentemente pela relação

$$Q_{dp} = c_b Q_{wp}, (0.1)$$

em que Q_{dp} é o caudal de ponta de cheia para um escoamento de aluvião, c_b é um coeficiente de caudal e Q_{wp} é o caudal de ponta de cheia para água limpa. Segundo Chen e Chuang (2014) c_b varia entre 5 e 40, dependendo da concentração de sólidos e das condições locais do evento. Rickenman (2016) refere que o valor de c_b para declives elevados (da ordem de 15%) pode variar entre 10 e 100. Nas bacias hidrográficas da Madeira, a *propagação* de aluviões como ondas de frente abrupta ocorre apenas nos trechos de montante das ribeiras. Na região mais a jusante das ribeiras, a aluvião propaga-se como um *“immature debris flow”* (Takahashi 2007). O pico acentuado que ocorre nas simulações do Cenário 2 pode ser explicado pela redução da rugosidade aparente do fundo resultante do transporte intenso de sedimentos e pelo efeito remanescente da acumulação do escoamento numa frente de onda abrupta, já atenuado na fase de *“immature debris flow”*. Considera-se, assim, que são realistas os hidrogramas nas secções finais das ribeiras, mostrados nas Figura 31, Figura 32 e Figura 33, que configuram valores de c_b entre 1,5 e 3.

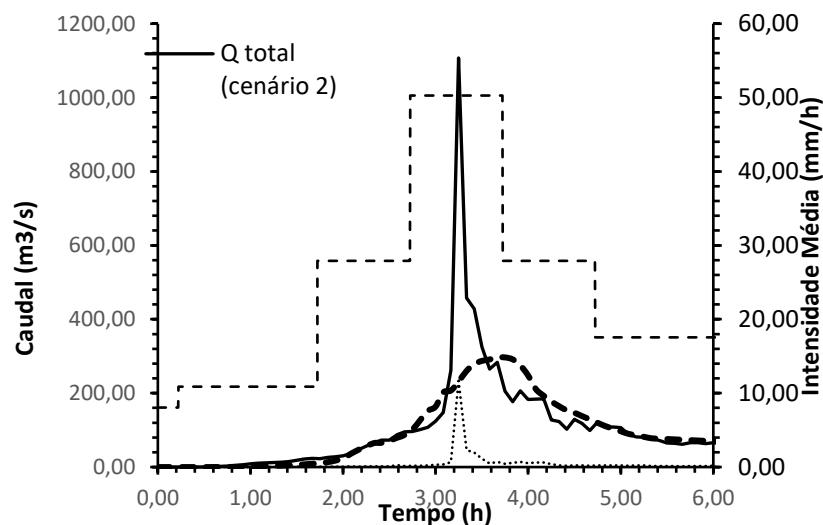


Figura 31 - Hidrograma, Ribeira de São João. Caudal Cenário 1, caudais total e sólido Cenário 2 e intensidade média da precipitação na bacia.

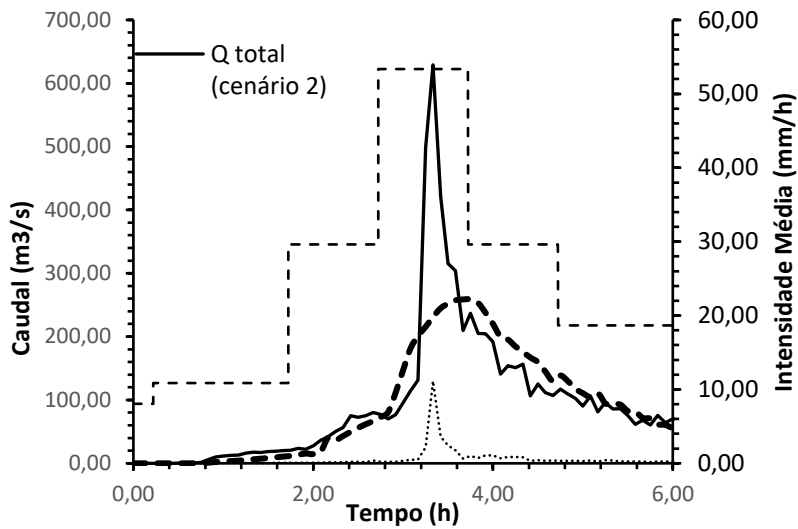


Figura 32- Hidrograma, Ribeira de Sta. Luzia. Caudal Cenário 1, caudais total e sólido Cenário 2 e intensidade média da precipitação na bacia.

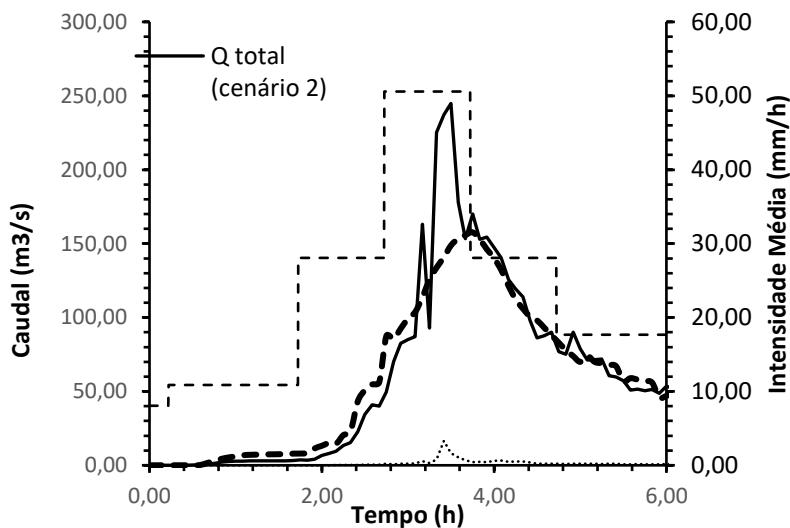


Figura 33- Hidrograma, Ribeira de João Gomes. Caudal Cenário 1, caudais total e sólido Cenário 2 e intensidade média da precipitação na bacia.

Para despistar possíveis erros numéricos conducentes à não conservação da massa e, logo, ao aumento do caudal da mistura, verificou-se a conservação da massa de líquido e da massa de sólidos. Procurou-se também verificar a consistência entre os valores dos caudais de ponta de cheia obtidos no Cenário 1 deste estudo e os obtidos em EARAM (2015). Os valores correspondentes medidos na secção final de cada ribeira, podem consultar-se no Quadro 13. Constatou-se que os caudais obtidos pelo modelo STAV2D, para as condições do Cenário 1, são da mesma ordem de grandeza que os obtidos pelo modelo hidrológico utilizado em EARAM (2015). Conclui-se, assim, que o modelo STAV2D funciona eficazmente como modelo hidrológico nas condições de precipitação e geometria das Ribeiras do Funchal.

Quadro 13 – Comparação de caudais de ponta de cheia, ribeiras do Funchal

Ribeira	EARAM 2015 (Caetano, et al. 2016) – água limpa	Cenário 1 – água limpa
São João	280	300
Sta. Luzia	264	260
João Gomes	172	160

A extensão da cheia para os dois cenários pode ser convertida em critério de severidade, de acordo com Karvonen et al. (2008) e Conde et al. (2015), a Figura 34 expõe a distribuição da probabilidade associada ao arrastamento pelo escoamento de uma pessoa em boas condições físicas.

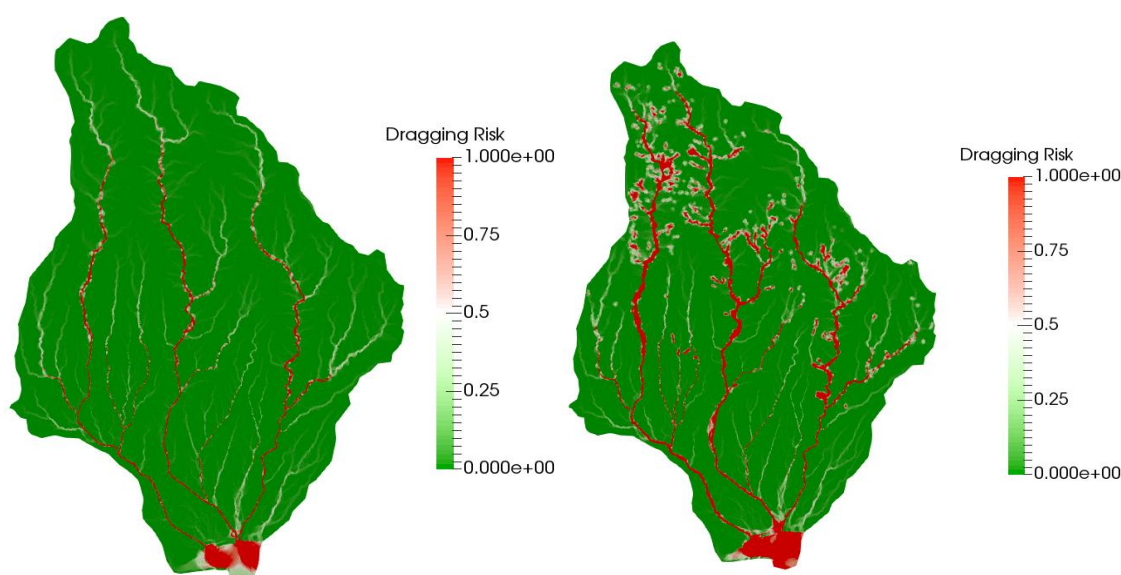


Figura 34 - Critério de arrastamento. Probabilidade de arrastamento de uma pessoa em boas condições físicas. Esquerda: simulação de água limpa (Cenário 1). Direita: simulação da aluvião (Cenário 2)

A Figura 34 mostra que a severidade da aluvião nas ribeiras que afluem ao Funchal é significativamente superior à de uma cheia de água limpa com o mesmo volume transportado de água.

Mostra-se, na Figura 35, na Figura 36 e na Figura 37, a comparação entre a envolvente máxima da extensão da inundação obtida no Cenário 2 deste estudo (aluvião - propagação de água e de material sólido) e a extensão da inundação obtida no estudo Municipia (2016). Esta comparação é legítima, mas carece de interpretação cuidada na medida em que as metodologias de cálculo são muito diferentes. Identificam-se, no Quadro 14, as principais diferenças entre estas metodologias.

Quadro 14 – Principais diferenças quanto às metodologias de cálculo do estudo Municipia (2016) e do presente estudo, Cenário 2.

	Municipia (2016)	Cenário 2, presente estudo
Tipo de modelo de simulação	Unidimensional	Bi-dimensional em planta
Regime de escoamento	Escoamento permanente (curva de regolfo a caudal constante)	Escoamento variável
Condições de fronteira hidrodinâmicas	Caudal constante, igual ao caudal de ponta de cheia gerada em bacias não erodíveis, introduzido na secção de definição da sub-bacia hidrográfica de um número limitado de linhas de água.	Precipitação transformada em escoamento na totalidade bacia compreendendo, simultaneamente, a geração dos volumes de sedimentos que integram as aluviões.
Tipo de leito, influência do transporte sólido.	Leito fixo, água limpa. Influência do transporte sólido por intermédio de sobreelevações do fundo <i>ah hoc</i> em algumas secções.	Leito móvel nos trechos não regularizados e nas encostas. Interações dinâmicas leito-escoamento. Escoamento bi-fásico de água e sedimentos.
Tipo de dados batimétricos altimétricos	Secções transversais provenientes de levantamentos	DEM corrigido para incluir a geometria das ribeiras regularizadas.

Na Figura 35 comparam-se as extensões de inundação na bacia da Ribeira de São João. Verifica-se que, em geral, a inundação prevista neste estudo   mais extensa que a obtida em Municipia (2016), o que se justifica pelo caudal de ponta mais elevado e pelas altera es morfológicas resultantes do transporte sólido. Nas zonas urbanas da Baixa do Funchal a diferença   significativa. Note-se ainda que há linhas de água não estudadas em Municipia (2016) onde podem ocorrer inunda es significativas.

Na Ribeira de Santa Luzia (Figura 36) registam-se também diferenças significativas entre a envolvente máxima calculada no Cenário 2 e a inunda o calculada por Municipia (2016). Na Ribeira de João Gomes (Figura 37) as diferenças são ainda perceptíveis mas menos relevantes na zona urbana na baixa do Funchal.

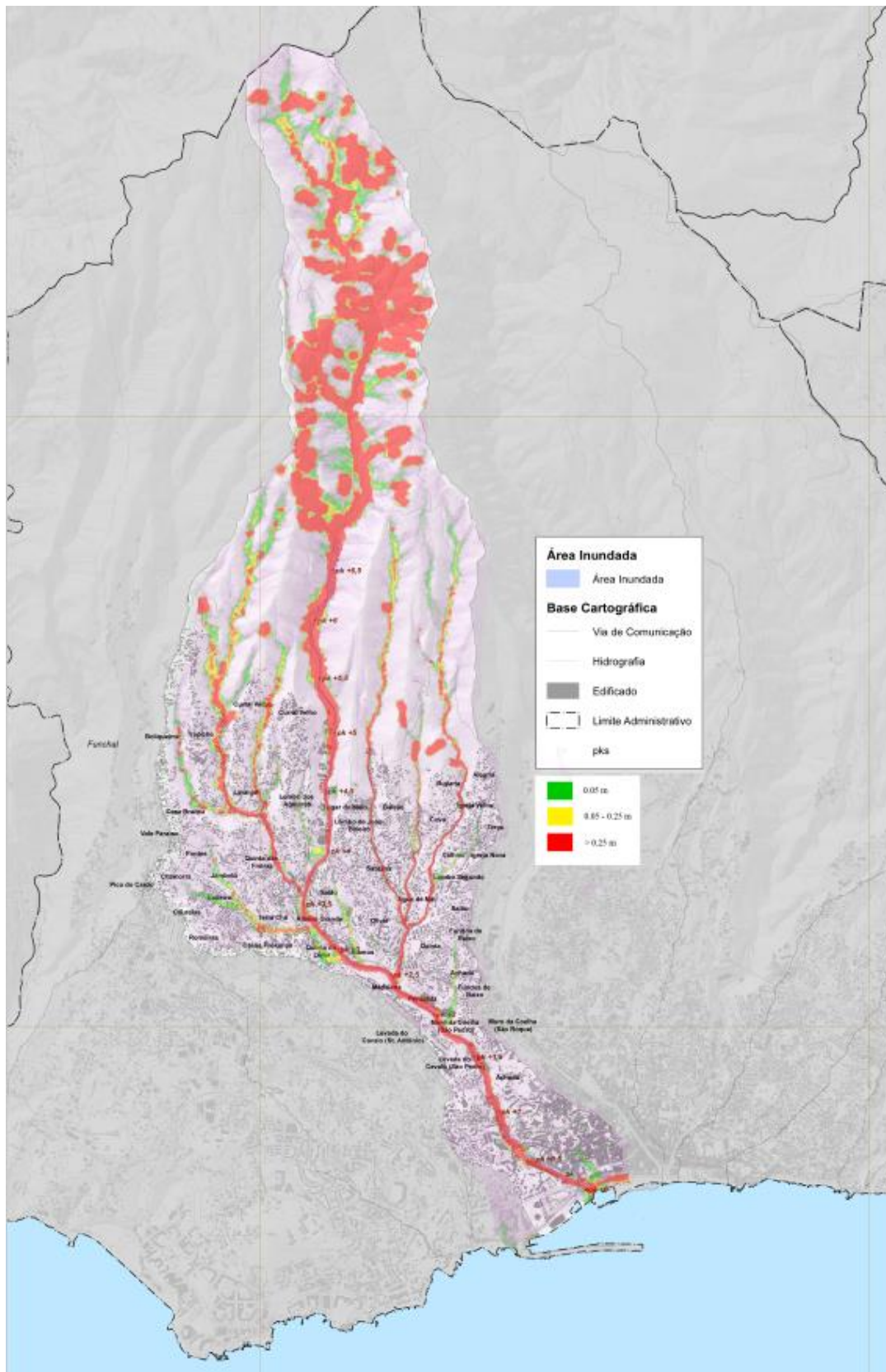


Figura 35 – Comparação da extensão máxima da inundação calculada neste estudo e a extensão da inundação correspondente ao estudo Municipia (2016). Bacia hidrográfica da Ribeira de São João

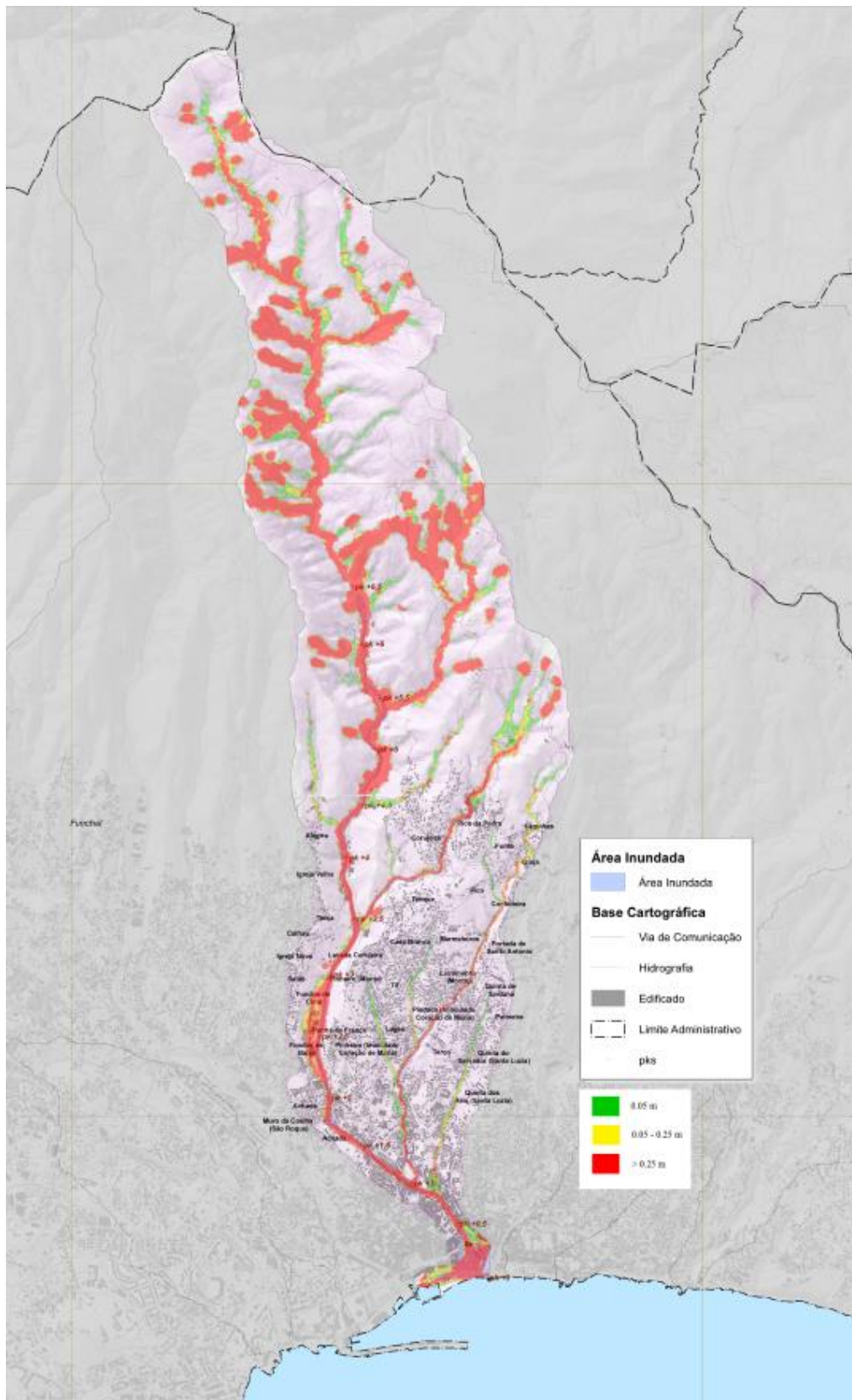


Figura 36 – Comparação da extensão máxima da inundação calculada neste estudo e a extensão da inundação correspondente ao estudo Municipia (2016). Bacia hidrográfica da Ribeira de Santa Luzia

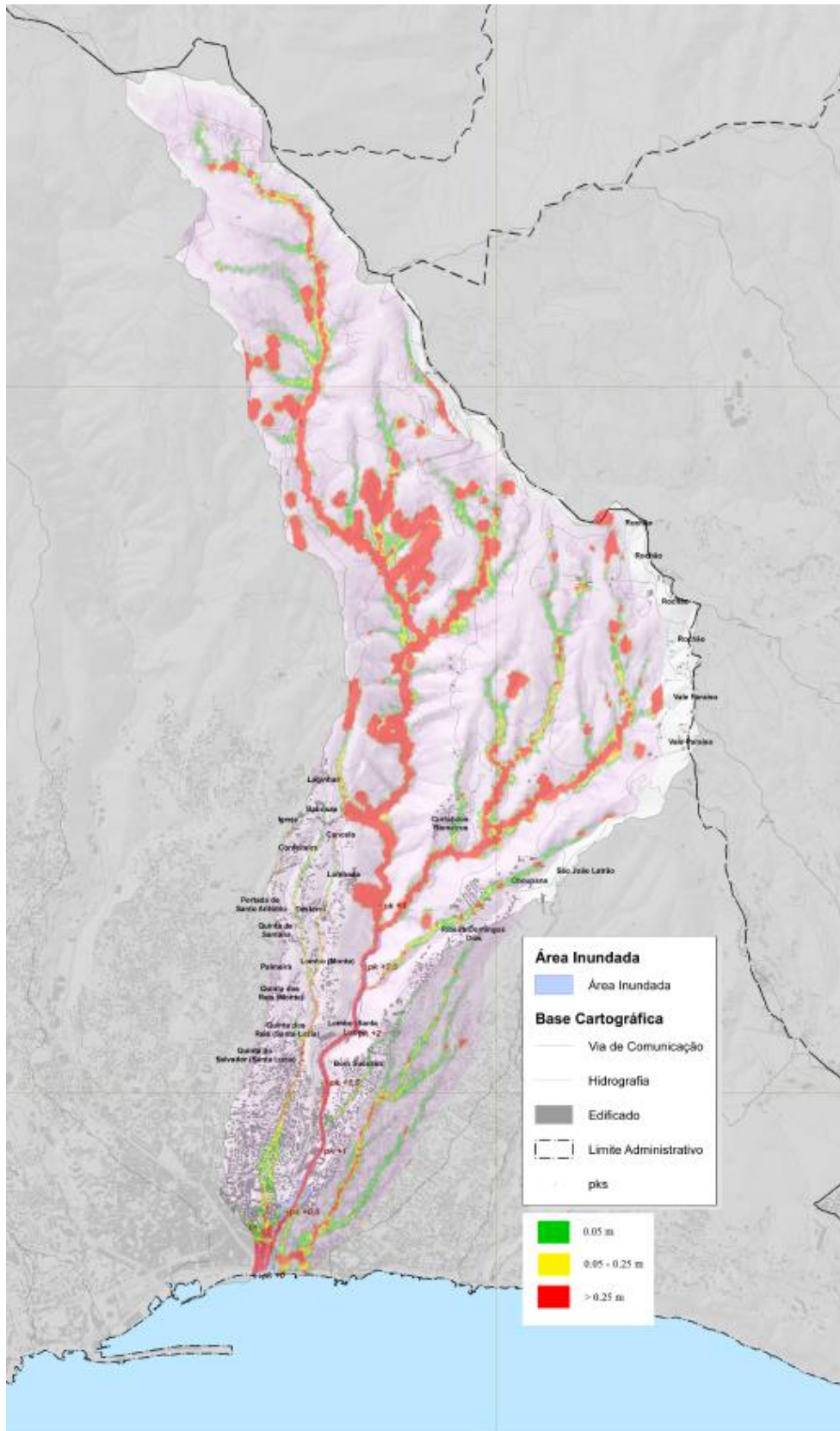


Figura 37 – Comparação da extensão máxima da inundação calculada neste estudo e a extensão da inundação correspondente ao estudo Municipia (2016). Bacia hidrográfica da Ribeira de João Gomes

Nesta bacia, o volume de material sólido gerado nas encostas, relativamente ao volume de escoamento líquido, é inferior ao das restantes ribeiras. Como consequência, o coeficiente c_b desta ribeira (equação (0.1) e Figura 33) é o mais reduzido das ribeiras do Funchal, o que justifica a menor extensão da envolvente de inundação máxima calculada neste estudo, em algumas zonas menor que a extensão da inundação calculada em Municipia (2016). No entanto, note-se que há linhas de água não estudadas em Municipia (2016) sujeitas a inundações relevantes.

6.3.3 Simulações na Ribeira do Machico

A bacia da Ribeira do Machico apresenta uma área de aproximadamente 25 km², com um declive médio de 50% e um tempo de concentração $t_c = 0.5$ h. Devido à presença de estruturas no MDT que serviu de elemento de base, o troço regularizado foi manualmente corrigido de modo a reproduzir as condições do terreno. O domínio foi discretizado com uma resolução de 1.5 m ao longo do troço regularizado e com uma resolução de até 20 m nas restantes zonas, resultando em aproximadamente 750000 células de cálculo. Não existindo um modelo de evapotranspiração, foi assumido um valor de perdas de 20%. De modo a considerar a mobilização de material das encostas devido a instabilização geotécnica considerou-se a estimativa de volumes correspondentes descrito no relatório publicado pelo IST, UA e LREC (2010), referentes ao evento de 20 de fevereiro de 2010. Admite-se que os escorregamentos ocorrem quando se regista o pico do hietograma. Pode ainda ocorrer erosão superficial nas encostas da bacia, por ação do escoamento superficial, bem como deposição de parte do material sólido que foi libertado nos deslizamentos de terra (especialmente em depressões do terreno).

Na secção da foz pode medir-se o hidrograma, resultando num caudal de ponta de cheia de aproximadamente 493 m³s⁻¹, como indicado na Figura 38.

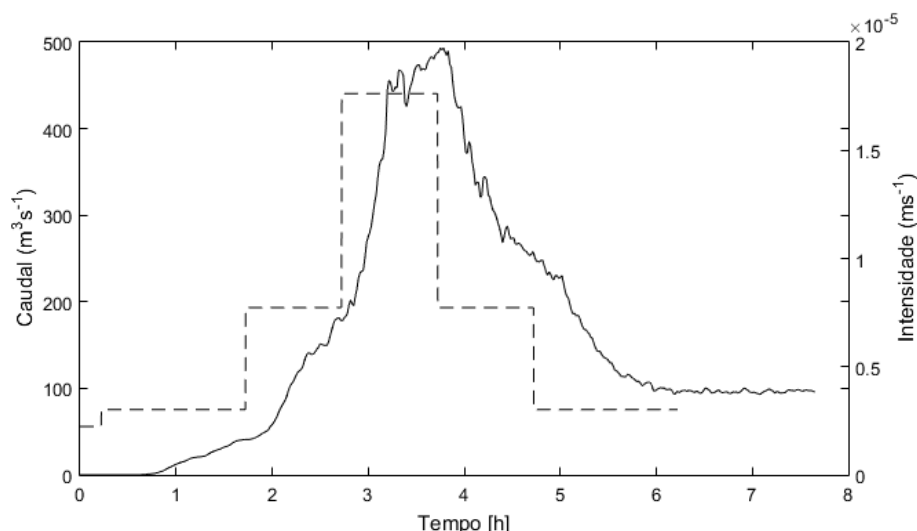


Figura 38 - Hietograma eficaz e hidrograma na secção da foz, Ribeira do Machico

O caudal de ponta de cheia de $493 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ difere do caudal de ponta de cheia estimado de $403 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, apresentado no *Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira - Fase 2*, (IST, ADIST, UM 2015). Todavia a diferença é relativamente pequena, compatível com o pouco caudal sólido gerado pelos relativamente poucos e pequenos deslizamentos no domínio. A quase ausência de deposição de material sólido foi, aliás, registada no evento de 20 de Fevereiro de 2010, o que valida o resultado obtido de concentração reduzida de material sólido. Assim, não se justifica a elaboração de simulações apenas com água limpa para efeitos de comparação.

Aplicando o critério de severidade baseado no estudo de Karvonen et al. (2008) (Conde et al. 2015), a Figura 39 expõe a distribuição da probabilidade associada ao arrastamento de uma pessoa média pelo escoamento.

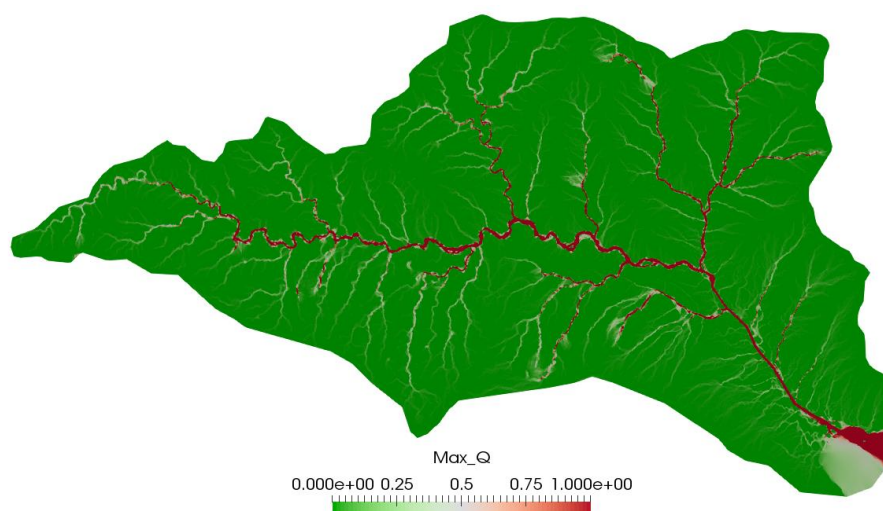


Figura 39 - Critério de arrastamento. Probabilidade de arrastamento de uma pessoa média.

Pela análise do mapa é visível que apenas no leito da ribeira e dos principais cursos de água se verifica risco de arrastamento, assim como na zona galgada do troço regularizado dentro da população do Machico.

A sobreposição da envolvente máxima da inundação calculada pelo modelo STAV2D e a inundação calculada em Municipia (2016) pode ser observada na Figura 40. O presente estudo preconiza uma menor inundação na zona urbana do Machico. Este facto deve-se a que o caudal de ponta de cheia é pouco superior ao caudal constante usado em Municipia (2016) e a metodologia de cálculo utilizada nesse estudo (ver Quadro 14), nomeadamente a simulação em regime permanente e o cálculo com modelo unidimensional, tende a sobrestimar as áreas inundadas. Note-se, todavia, que se registam inundações em linhas de água não estudadas por Municipia (2016).

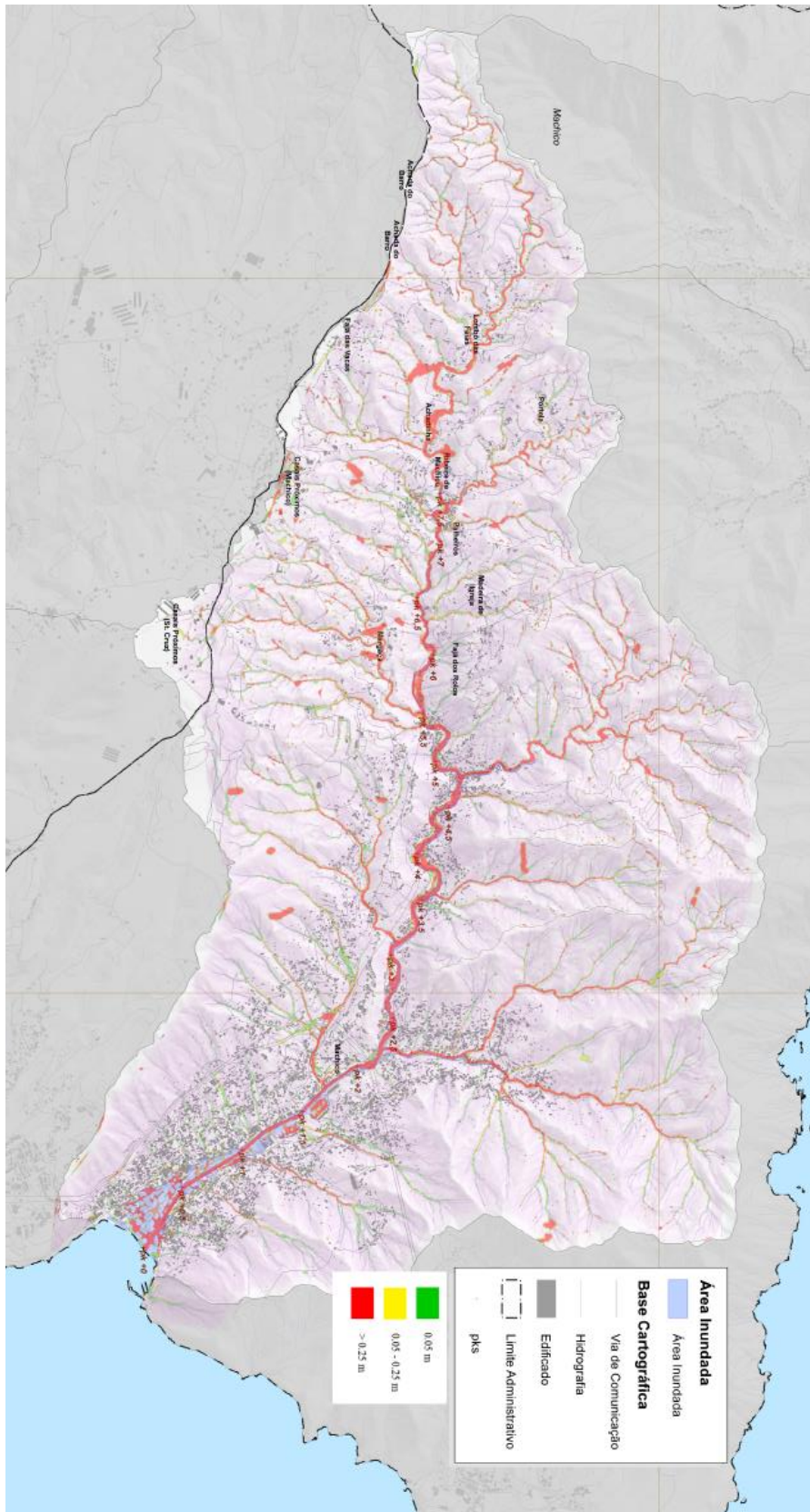


Figura 40 – Comparação da extensão máxima da inundação calculada neste estudo e a extensão da inundação correspondente ao estudo Município (2016). Bacia hidrográfica da ribeira do Machico

6.4 Síntese e conclusões

Neste estudo procurou-se descrever o uso de ferramentas de simulação matemática para apoio à definição de medidas de mitigação do risco de aluviões. Esta metodologia foi testada nas bacias hidrográficas do Funchal (São João, Santa Luzia e João Gomes) e do Machico. Compreende a utilização de uma ferramenta de simulação matemática (neste caso o modelo STAV2D) susceptível de descrever, à escala da bacia hidrográfica, o movimento de misturas de água e material sólido gerado nas encostas e trocado nos trechos móveis das ribeiras. No contexto da preparação dos mapas de risco de inundação é especialmente pertinente discutir as diferenças entre esta metodologia e a proposta em Municipia (2016), que compreende essencialmente modelação com base em modelos unidimensionais válidos para a propagação de cheias de água limpa.

Apresentam-se de seguida as principais conclusões e recomendações:

- As aluviões são movimentos de água e material sólido cuja simulação requer modelos conceptuais que incorporem os aspectos específicos desta propagação, nomeadamente a reologia da mistura e os efeitos inerciais. A consequência porventura mais gravosa de se ignorar a componente sólida é a subestimação do caudal de ponta da aluvião. No Quadro 15 resumem-se nas 3 primeiras colunas as estimativas do caudal de ponta de cheia, considerando apenas o escoamento de água, obtidos em IST, ADIST, UM (2015), Municipia (2016) e no presente estudo (cenário 1) para as ribeiras do Funchal. Os valores são consistentes e indicam que, para a mesma precipitação, a estimativa para o caudal de ponta de cheia é robusta. Todavia, a simulação conduzida nas condições do Cenário 2 (propagação de água e de sedimentos) apresenta caudais de ponta entre 1,3 e 3,7 vezes superiores aos obtidos com água limpa para as ribeiras do Funchal.

Quadro 15 – Comparação de caudais de ponta de cheia, ribeiras do Funchal

Ribeira	Caudal (m^3s^{-1})			
	EARAM 2015 (Caetano, et al. 2016) – água limpa	Municipia (2016) – água limpa	Cenário 1 – água limpa	Cenário 2 - aluvião (água e sedimentos)
João Gomes	280	320	300	1100
Sta. Luzia	264	327	260	630
S. João	172	226	160	250



- Este aumento do caudal de ponta é uma consequência de efeitos inerciais associados às elevadas concentrações de sedimentos transportados. O efeito é conhecido e descrito na bibliografia de “*debris flows*”, sendo o aumento do caudal de ponta geralmente descrito pela fórmula (0.1). Conclui-se, assim, que se forem expectáveis movimentos de massa nas encostas o caudal de ponta de cheia não deverá ser calculado pelos métodos tradicionais, mas sim determinado pela aplicação de um modelo hidrodinâmico e morfológico aplicado às sub-bacias onde se regista a produção de sedimentos. A metodologia empregue em Município (2016) pode conduzir a consideráveis subestimações do caudal de ponta de cheia e, conseqüentemente, à subestimação da exposição à aluvião.
- No caso de a produção de sedimentos nas encostas ser reduzido, é expectável que o caudal de ponta da aluvião seja aproximadamente igual ao obtido para água limpa. É este o caso da bacia hidrográfica do Machico, como se pode observar no Quadro 15.
- Dada a incerteza na determinação dos volumes de material sólido decorrentes da instabilização das encostas, recomenda-se que o caudal de ponta de cheia seja majorado por um factor não inferior a 3 nas ribeiras da vertente sul da Madeira, no caso de se pretender dimensionar obras de regularização recorrendo a simulações aplicáveis para água limpa.
- As simulações realizadas em regime variável por um modelo bi-dimensional, com leito móvel e transporte sólido, conduzem a áreas de inundação substancialmente superiores às obtidas por simulações produzidas com um modelo unidimensional, em regime permanente e leito fixo, sempre que a quantidade de material sólido mobilizada nas encostas é significativa. Este é o caso das Ribeiras de São João e Santa Luzia. Na Ribeira de João Gomes as diferenças são menos significativas e na ribeira que atravessa o Machico, não havendo produção significativa de sedimentos, o modelo unidimensional conduz, em algumas zonas, a maiores áreas inundadas. Recomenda-se, sendo expectáveis elevados volumes de material sólido, a simulação dos impactes da aluvião seja feita de acordo com a metodologia preconizada neste estudo, nomeadamente geração conjunta de escoamento de água e material sólido e propagação em regime variável por um modelo bidimensional e planta.
- Recomenda-se que os impactes da aluvião sejam categorizados segundo critérios testados em situações realistas, fisicamente e fisiologicamente, como o que decorre do estudo de Karvonen et al. (2008), aplicado por Conde et al. (2015) no contexto de inundações em Lisboa.

- Recomenda-se ainda que se procure utilizar critérios de mobilização de material sólido nas encostas como parte integrante de estudos que visem quantificar o risco associado a aluviões na Madeira.

7 Gestão de risco

7.1 Enquadramento e caracterização do risco de aluviões

Na Fase 1 do EARAM procedeu-se à avaliação do risco associado às aluviões na ilha da Madeira e apresentou-se um conjunto de potenciais medidas mitigadoras. Na Fase 2, a equipa do EARAM teve como objetivo principal alargar o âmbito da intervenção a toda a ilha da Madeira e aprofundar algumas das recomendações associadas à avaliação do risco por forma a consolidar uma gestão do risco mais eficaz.

A identificação do problema, considerado um perigo objetivo, justifica-se não só pela ocorrência do evento 20/2/2010 mas, também, pelos antecedentes históricos registados na ilha da Madeira e pelo conjunto de fatores peculiares resultantes das características meteorológicas, geomórficas e topográficas da região.

Tendo em conta os dados históricos de ocorrência de aluviões na ilha da Madeira e as vítimas mortais delas decorrentes, concluiu-se (2010) que o risco empírico de aluviões estava associado a um valor aproximado da ordem de 0.2 vítimas/ano sendo o período de recorrência empírico global (ilha da Madeira) da ordem de 5 a 10 anos. Recorda-se que o evento de 20 de fevereiro de 2010 provocou 48 vítimas mortais, 250 feridos e 600 desalojados.

A principal preocupação da referida avaliação incidiu na proteção de pessoas (ocupação humana) e de bens expostos, nomeadamente habitações e infraestruturas estratégicas (bens físicos e patrimoniais). Para além dos danos diretos, há que ter em conta os danos indiretos decorrentes da ocorrência de uma aluvião intensa salientando-se os danos ambientais, económicos e sociais.

Como quadro conceptual de avaliação do risco, adotou-se o modelo básico que compreende a integração de três grupos de componentes na avaliação e quantificação dos riscos, a saber:

- P - Perigosidade do evento ou processo natural em consideração (aluviões), o qual é caracterizado pela probabilidade ou frequência de ocorrência de cenários com determinadas características ou intensidades;
- E - Exposição de bens ou valores ao impacto do processo perigoso em consideração e que se encontram nas zonas de propagação desse processo;
- V - Vulnerabilidade dos bens expostos que caracteriza a suscetibilidade dos mesmos ao impacto do processo ou o grau de dano resultante.

A caracterização destes componentes depende das características naturais do território, e da respetiva envolvente atmosférica, e das características da ocupação humana do mesmo.

Quanto à *Perigosidade* dos eventos há a considerar que, atendendo à complexidade e às incertezas na concretização dos processos associados ao fenómeno em causa e à carência de dados sistemáticos correspondentes aos diferentes fatores associados, não é possível uma avaliação fiável do período de retorno ou da probabilidade de ocorrência das aluviões com intensidade semelhante ou superior à do evento de 20/02/2010.

No caso do evento de 20/02/2010, a desagregação do acontecimento nos respetivos componentes principais, em particular a formação de escoamentos líquidos, a ocorrência de deslizamentos e os volumes de sólidos transportados, só permite obter uma caracterização quantitativa incompleta do grau de excecionalidade do acontecimento. Com efeito, não obstante o esforço na recolha de elementos referentes ao ocorrido, não é possível caracterizar sob a forma probabilística a conjugação dos principais fatores que contribuíram para o processo de formação das aluviões que ocorreram em cada uma das bacias: os elementos associados a um evento complexo isolado não permitem a caracterização estatística desses eventos no futuro.

Também não se afigura ser possível, no futuro, o controlo total ou a eliminação da ocorrência das aluviões. Com efeito, de acordo com as características do processo, tal controlo só poderia incidir na respetiva fase terrestre, isto é, na fase sólida das cheias, o que implicaria a estabilização total das encostas e a eliminação dos potenciais depósitos mobilizáveis de modo que as cheias, em todas as bacias hidrográficas e para todas as chuvadas, só comportassem, predominantemente, a fase líquida. Deste modo, o risco passaria a ser o de ocorrência de escoamentos líquidos resultantes de precipitações mais ou menos intensas ou prolongadas.

Uma forma teoricamente possível de mitigar a intensidade dos escoamentos com detritos seria a de atuar no coberto vegetal das encostas mais críticas. No entanto, os resultados dos estudos efetuados na Fase 1 e os resultados conhecidos da literatura, são suficientemente contraditórios ou pouco conclusivos para dificultarem, ou não aconselharem, propostas de ações intensivas concretas para além das medidas em curso de reflorestação a cargo das entidades competentes e de estudos em zonas experimentais.

Nesta conformidade, as principais medidas de gestão e de mitigação dos riscos das aluviões terão que incidir, fundamentalmente, nos outros dois componentes da avaliação do risco: a *Exposição* de pessoas e bens nas zonas de propagação ou suscetíveis de ocorrência de inundações e a *Vulnerabilidade e Resiliência* do exposto ao impacto das aluviões. Em conclusão, as medidas, estruturais ou não-estruturais, são, fundamentalmente, de proteção ou de condicionamento da exposição ao risco.

Com efeito, a gravidade das consequências da ocorrência de aluviões depende da intensidade da aluvião nas zonas de impacto, das características de ocupação nas áreas de propagação e de deposição dos detritos e, ainda, de outros fatores adicionais incontrolláveis como o período temporal (hora, de dia ou de noite) e o dia de semana da ocorrência.

Assim, diminuir a exposição permanente de bens ou de pessoas em períodos de ameaça de ocorrência previsível de aluviões e ainda atenuar a possibilidade de impacto direto dos escoamentos por forma a diminuir os danos expectáveis, são as linhas estratégicas mais adequadas.

Para além das propostas de um conjunto de medidas no âmbito do EARAM, considera-se ser fundamental uma coordenação efetiva, especializada e a integração das diferentes medidas de gestão do risco, em toda a ilha da Madeira, por forma a garantir alguma eficácia se e quando voltar a ocorrer uma aluvião intensa.

Na Fase 2 do EARAM foram aprofundadas algumas das medidas identificadas na Fase1 conforme se resume seguidamente.

7.2 Princípios orientadores de proteção contra aluviões

No âmbito do presente estudo adotou-se na Fase 1 do EARAM um conjunto de princípios orientadores para definição das medidas de mitigação do risco de aluviões e de enquadramento de projetos de implementação de medidas de proteção.

Estes princípios foram agrupados e caracterizados em seis tipos de ação:

- I. Retenção do material sólido
- II. Controlo do transporte de material sólido (detritos)
- III. Atenuação da vulnerabilidade das áreas expostas
- IV. Controlo da exposição ao risco
- V. Previsão e aviso – Sistema estruturado de previsão
- VI. Formação e informação ao público.

Atendendo às incertezas na caracterização do fenómeno, tornou-se imperioso proceder à seleção de medidas de proteção ou de atenuação do risco que possam ser implementados de uma forma planeada e sustentável. A monitorização do respetivo desempenho permitirá ajustamentos e eventuais melhorias.

7.3 Medidas de prevenção e de proteção estudadas no EARAM

7.3.1 Considerações gerais

Atendendo, à necessidade de proteção das zonas mais expostas ao risco de aluviões, as medidas prioritárias subordinam-se a um princípio estratégico fundamental: diminuir a intensidade das aluviões e diminuir a exposição e a vulnerabilidade de pessoas e bens potencialmente sujeitos ao impacto de fluxos de água e sólidos.

Atendendo à natureza complexa da génese e desenvolvimento do fenómeno, é difícil selecionar medidas eficazes ou de ações que conduzam rapidamente à redução significativa da frequência de ocorrência de aluviões intensas. Estas medidas deveriam atuar nos fatores físicos que desencadeiam a instabilização de material sólido das bacias e a formação de escoamentos com elevados caudais líquidos e sólidos (e.g. estabilização de vertentes com um coberto vegetal adequada). Este tipo de medidas só poderá ter efeitos a médio e longo prazos.

Atendendo a que não é possível eliminar completamente o risco, considerou-se ser aconselhável promover um conjunto de medidas de proteção, tendo em conta as características intrínsecas do processo das aluviões, os condicionamentos físicos e sociais da ilha da Madeira e a organização de ações adequadas de gestão integrada do risco em cada bacia hidrográfica.

Assim, a maioria das medidas de mitigação do risco propostas no âmbito do EARAM estão diretamente associadas à proteção de pessoas e bens em zonas críticas de ocupação permanente ou que são especialmente vulneráveis ao impacto dos escoamentos. Deste ponto de vista, as medidas propostas podem ser consideradas, na generalidade, como medidas de proteção contra os efeitos de potenciais aluviões que ocorram no futuro.

As medidas de proteção podem ser do tipo estrutural quando são constituídas por intervenções que incluam a implementação de sistemas de proteção especiais (naturais ou artificiais) com incidência nos processos de iniciação, transporte ou deposição do material sólido. Estas soluções atenuam a intensidade ou dos escoamentos mistos ou atenuam o impacto direto nas zonas sensíveis que se pretendem proteger diminuindo, assim, o valor expectável dos danos ou das consequências.

Outras medidas de proteção são do tipo não-estrutural, ou passivas, atendendo a que não interferem diretamente com o processo físico das aluviões, mas alteram a exposição espacial dos bens, eliminando ou condicionando a exposição excessiva ou perigosa, e diminuem a vulnerabilidade das pessoas nas zonas de risco, através de sistemas de aviso e informação, do conhecimento das zonas de risco e, eventualmente, da transferência do risco através de seguros apropriados.

Pretende-se não só atenuar o risco através da diminuição da intensidade local dos eventos, nas áreas mais sensíveis, como, também, promover a prática da decisão informada pelo risco na ocupação do território, nas situações em que a segurança das pessoas e a economia da Região possam estar em causa em resultado da possibilidade de ocorrência de aluviões.

Com efeito, é previsível que a sociedade conviva mais naturalmente com a exposição a riscos permanentes associados a fatores naturais de ordem geomorfológica, geológica e climática do que a outros tipos de riscos. Este facto afeta a perceção pública do risco e a mobilização continuada para a auto - proteção com efeitos no planeamento e nas decisões associadas à ocupação de zonas potencialmente perigosas como é o caso de licenciamentos para construção.

Em Portugal, não está estruturado o conceito de risco socialmente aceitável, ou tolerável, como instrumento de apoio à decisão que pretende introduzir um critério de apreciação que tenha em conta a probabilidade e os danos numa decisão associada a um risco público. Outros critérios de apreciação contemplam, ainda, um conceito complementar: o princípio ALARP (“As Low as Reasonable Possible”), o qual corresponde à faixa de situações de risco entre socialmente aceitável e não aceitável. A aceitação destas situações só se justifica então quando é possível demonstrar que é socialmente desproporcionado o esforço de redução do risco face ao resultado final. Assim, na ausência deste tipo de critérios operacionais, muitas das medidas tenderam a ser vertidas em instrumentos de ordenamento do território como é o caso dos PDM.

A transposição da Diretiva nº2007/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de outubro de 2007, para a ordem jurídica interna de Portugal, permite o reforço do quadro legal no que respeita os instrumentos referentes à avaliação, gestão e mitigação de riscos associados a inundações. A adequada adaptação desta legislação nacional à Região Autónoma da Madeira reveste-se da maior relevância atendendo às características particulares das cheias e das bacias hidrográficas da ilha da Madeira.

7.3.2 Contribuições do EARAM para a gestão do risco das aluviões

7.3.2.1 *Medidas estruturais*

7.3.2.1.1 *Controlo do coberto vegetal*

Uma parte significativa da área das bacias hidrográficas das ribeiras é potenciadora de uma elevada produção de fluxos de materiais sólidos, os quais constituem o componente mais perigoso das aluviões que podem ocorrer na ilha. Esta produção é desencadeada pela ação da precipitação e da conseqüente 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

encostas, movimentos de massa, erosões localizadas ou ravinamentos e erosões nos fundos e margens dos leitos das ribeiras. Assim, diminuir o volume total de material sólido deslocado nas referidas condições constitui um princípio teoricamente positivo de gestão do risco e de diminuição da intensidade das aluviões. Para a prossecução deste objetivo as intervenções deveriam incidir nas áreas das cabeceiras, nas encostas e nos leitos de ribeiras, envolvendo as seguintes ações:

- Promoção de um coberto vegetal adequado, em áreas que se revelem carenciadas, para potenciar uma melhor estabilização de taludes face a situações de elevada intensidade de precipitação e saturação no solo;
- Modelação do terreno para estabilização preventiva de encostas ou manutenção ativa de zonas com terraços já existentes, no caso de ser possível e justificável;
- Consolidação de trechos dos leitos das ribeiras com maior declive e com maior produção de fluxos de material sólido através da estabilização do leito por estruturas transversais (diques ou degraus) e da proteção localizada de depósitos marginais por estruturas longitudinais;
- Controlo cuidadoso da colocação de aterros atendendo a que estes podem constituir, com relativa facilidade, fontes de material sólido mobilizáveis.

No que se refere às medidas específicas envolvendo o coberto vegetal, em áreas que se justifique, salienta-se que a ilha da Madeira tem sido objeto de significativas ações de reflorestação e de proteção ambiental. Não obstante as opiniões que, de uma forma persistente, conceituados autores manifestaram nas últimas décadas, a influência do tipo de coberto vegetal nas condições de estabilidade de encostas vulneráveis a movimentos de massa sob a ação de precipitações intensas é, ainda, matéria controversa a nível internacional, em particular no que concerne ao arvoredo de grande porte. Salienta-se, em particular, que este tipo de vegetação possui uma elevada capacidade destrutiva e de obstrução quando transportado por uma cheia. As conclusões definitivas correspondentes a cada região só poderão ser obtidas a longo prazo, após uma monitorização sistemática do comportamento diferenciado dos distintos tipos de vegetação em diferentes condições de terreno, solo e clima. O estudo de proteção contra as aluviões poderá, no entanto, proporcionar a oportunidade para reavaliar a opção por certas espécies vegetais em determinadas condições de terreno.

Os incêndios que ocorreram após o evento de 2010 atingiram áreas significativas das bacias do Funchal. A respetiva reflorestação deverá ter em conta o risco das aluviões proporcionando uma prevenção mais eficaz no futuro.

Contribuição do EARAM: na Fase 1 foi efetuado uma análise aprofundada do tema e procuraram-se indícios objetivos dos efeitos do tipo de coberto vegetal nos

deslizamentos das aluviões de 2010. Os resultados não foram totalmente conclusivos pelo que se aconselha o prosseguimento dos estudos referentes ao tipo de vegetação, aos efeitos da infiltração da precipitação e do tipo de enraizamento mais eficaz na estabilidade de camadas pouco espessas de solos sobre os substratos impermeáveis.

7.3.2.1.2 - Controlo do transporte de material sólido

O fluxo de material sólido (caudal sólido), de diferentes dimensões, associado ao caudal líquido, é uma característica marcante do fenómeno designado por aluvião. Esta perigosa característica constitui um fator crítico na gestão do risco de aluviões e na proteção contra os respetivos efeitos.

Neste quadro, a criação de condições de escoamento que promovam a deposição do material sólido em locais adequados, a montante de zonas sensíveis ou críticas, é um objetivo fundamental das intervenções a realizar. A retenção do maior volume possível de material sólido em movimento permite a mitigação do risco associado a aluviões nas zonas expostas a jusante e a atenuação da gravidade do impacto dos escoamentos nessas zonas, nomeadamente em zonas urbanas como a cidade do Funchal.

A implementação de sistemas ou estruturas transversais de interceção e retenção (temporária) de material sólido com maiores dimensões deve assim ser considerada como uma medida prioritária para a proteção, a curto prazo de zonas críticas expostas ao perigo. Para esta medida ser eficaz, a conceção e dimensionamento das estruturas deve assegurar a passagem do escoamento líquido e de sólidos com menor dimensão, enquanto os blocos com maior potencialidade destrutiva ficam retidos. Para manter a eficácia de proteção deste tipo de estruturas torna-se necessário garantir que o material retido é posteriormente removido para que a capacidade de retenção se mantenha disponível, o que exige a existência de condições de acesso aos locais de implantação destas infraestruturas e de sustentabilidade económica da exploração respetiva.

Tendo em conta as características do escoamento, líquido e sólido, e a localização da estrutura de retenção, podem ser considerados dois tipos de estruturas:

- Estruturas “leves”, eventualmente do tipo “rede”, em linhas de água secundárias ou ravinas com uma pequena bacia hidrográfica e com um pequeno volume potencial de material a reter.
- Estruturas concentradas e de maior porte, a localizar em secções estratégicas das ribeiras, no canal de condução dos escoamentos, com características topográficas adequadas que propiciem a desaceleração e paragem de parte do escoamento sólido, e a retenção de um volume relativamente apreciável de material sólido com dimensões maiores, por forma a constituírem barreiras eficazes na atenuação, para jusante, do poder destrutivo das aluviões de grande intensidade.

O número e as dimensões destes dois tipos de estruturas dependem das características da ribeira e da respetiva análise custo-eficácia, em função do volume e da dimensão mínima dos sólidos que devam ser retidos. A necessidade de acesso para permitir a limpeza do material retido é um dos principais condicionalismos na configuração e dimensionamento de um programa de implementação de estruturas de retenção de sedimentos.

Contribuição do EARAM: para proteção da cidade do Funchal, o EARAM contribuiu na seleção do tipo de estrutura de retenção mais indicado para as ribeiras de Santa Luzia, João Gomes e São João. O programa inicial envolveu a proposta de quatro estruturas em cada ribeira. A equipa do EARAM colaborou com as equipas de projetistas na definição de metodologias de análise e dimensionamento das estruturas tendo em conta as características potenciais dos detritos transportados. Os volumes previstos de sólidos retidos em cada uma das diferentes estruturas variam entre 8 000 e 35 000 m³. Salienta-se que o volume total de sedimentos mobilizados nestas três ribeiras em 20 de fevereiro de 2010 foi estimado (EARAM, Fase1) entre cerca de 216 000 m³ e 540 000 m³. Conclui-se, assim, que o volume de retenção previsto constituir uma percentagem relevante do volume total mobilizável num evento futuro. Este tipo de estrutura de proteção poderá vir a ser replicado noutras bacias da ilha da Madeira. A solução técnica a adotar deve garantir um elevado nível de segurança estrutural e hidráulica e ter em conta o comportamento erosivo e a capacidade de transporte do escoamento para jusante de cada estrutura.

O comportamento deste tipo de estruturas foi objeto de ensaios em modelo físico executados no laboratório de hidráulica do IST, no âmbito de outro projeto. A eficácia deste tipo de medida deve ser, contudo, aferida com base na experiência que venha a ser adquirida no futuro.

Na Figura 41 e na Figura 42 apresentam-se, respetivamente, uma antecipação computacional de um açude e o aspeto da obra após a construção, em 2013 (ribeira de Santa Luzia).



Figura 41 - Exemplo de medida estrutural. Antecipação computacional de uma estrutura de retenção de material sólido (empresa LCW).



Figura 42 - Exemplo de medida estrutural. Estrutura de retenção construída na ribeira de Santa Luzia (2013).

7.3.2.2 - Proteção e atenuação da vulnerabilidade das áreas expostas a aluviões

Algumas áreas socialmente mais sensíveis estão localizadas em trechos de ribeira diretamente expostos ao perigo das aluviões. É o caso frequente das zonas terminais das ribeiras (cones de dejeção) onde se localizam populações em zonas urbanas concentradas e consolidadas, atividades industriais e comerciais e infraestruturas estratégicas (e.g. a área da cidade do Funchal localizada nas margens dos trechos terminais das ribeiras de S. João, Santa Luzia e de João Gomes). A mitigação dos potenciais danos ou das consequências em bens localizados nessas zonas (atenuação das respetivas vulnerabilidades), relativamente à ocorrência de aluviões, exige a implementação de um conjunto integrado de medidas locais.

As medidas de proteção direta das pessoas e bens nas zonas urbanas consolidadas baseiam-se em estruturas longitudinais (muros), dimensionadas de forma a conterem escoamentos excecionais de acordo com a aplicação de um critério de dimensionamento e de tolerabilidade socialmente aceitável. As características dos leitos canalizados devem obedecer a determinados requisitos hidráulicos, nomeadamente os seguintes:

- Controlar a tendência de paragem progressiva de material sólido por redução do declive do fundo ou por gradual diminuição da velocidade do escoamento líquido, nomeadamente na zona imediatamente a montante da foz. A deposição de material diminui drasticamente a secção líquida disponível e propicia o galgamento dos muros e a inundaçãodescontrolada das margens.
- Evitar obstruções estruturais ou “singularidades”, incluindo a cobertura por lajes, que, localmente, possam vir a constituir entraves significativos aos escoamentos líquidos e sólidos. Os possíveis efeitos de mudança de direção (curvas) ou de largura devem ser devidamente considerados na fixação da cota dos muros laterais e de zonas marginais de segurança.

Estas medidas podem exigir ações excecionais de intervenção nas zonas marginais que se revelem necessárias, nomeadamente i) a remoção de obstruções aos fluxos líquidos e sólidos ii) a avaliação das condições de estabilidade e de segurança dos muros e respetivas fundações nos trechos canalizados mais antigos como é o caso na zona central da cidade do Funchal e iii) a avaliação das condições de drenagem pluvial das zonas urbanas, nomeadamente no centro da cidade do Funchal, tendo em conta as chuvadas intensas e o material sólido arrastado.

A proteção e o controlo da vulnerabilidade de bens isolados (habitações ou instalações relativamente dispersas) devem seguir critérios explícitos e consistentes para cada situação concreta.

Existem situações em que habitações isoladas ou conjuntos de habitações estão construídos em encostas com um elevado perigo de movimentos de massa que podem ser desencadeados por eventos de precipitação e escoamento superficial. Não obstante estas situações poderem estar associadas a fenómenos hidrológicos, o respetivo risco é, predominantemente, geotécnico pois pode não resultar de um impacto direto de escoamentos em ravinas ou em ribeiras. Nestes casos, as medidas de defesa ou proteção prioritárias podem ser do seguinte tipo:

- Consolidação ou estabilização de taludes e implementação de sistemas de drenagem eficazes, nos casos em que se justifique.
- Seleção de um coberto vegetal estabilizador mais propício, caso se justifique.
- Remoção de habitações que se encontrem em condições de risco intoleráveis.
- Controlo de novas construções, em sede dos planos de desenvolvimento municipais ou de ordenamento do território, tendo em conta os riscos geotécnicos de movimentos de massa.

As vias de comunicação rodoviárias são infraestruturas particularmente vulneráveis aos efeitos dos escoamentos bifásicos de água e sólidos, nomeadamente quando submetidas ao respetivo impacto nas obras de arte mais antigas (pontes) ou quando os respetivos traçados intercetam sucessivas linhas de água secundárias ou ravinas e se desenvolvam ao longo de encostas ou taludes com elevada suscetibilidade de movimentos de massa. Nestas condições, os utentes destas infraestruturas ficam particularmente vulneráveis sendo o risco de perda de vidas muito elevado.

Conforme foi referido no Relatório Final da Fase 1 do EARAM, a mitigação das vulnerabilidades nas vias rodoviárias localizadas em zonas de aluviões deve compreender medidas específicas, nomeadamente as dos seguintes tipos:

- 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.
- As vias rodoviárias construídas em aterro ao longo de zonas marginais críticas deverão ter os taludes protegidos tendo em conta a capacidade erosiva dos escoamentos.
- As secções hidráulicas de passagem sob as vias devem ter uma capacidade de vazão adequada, consistente com o critério de excecionalidade adotado e com as características específicas dos escoamentos mistos, líquidos e sólidos, e prever disposições que tendam a evitar a acumulação de material sólido e a total obstrução das referidas passagens.

- Em trechos com maior risco de deslizamento nos taludes marginais devem ser previstas barreiras de retenção ou de desvio, localizadas ou contínuas.
- Em trechos localizados em zonas críticas do leito das ribeiras poder-se-á justificar a consideração da adoção de uma solução estrutural em pilares, em substituição de aterros, por 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 proteção contra erosões localizadas.

Contribuição do EARAM: a implementação deste tipo de medidas estruturais e a reconstrução de estruturas destruídas ou danificadas pelas aluviões de 2010 têm estado a cargo das entidades regionais competentes (governo central e autarquias) salientando-se as obras já efetuadas ou previstas nos concelhos do Funchal e da Ribeira Brava. De um modo geral, a conceção geral dessas intervenções seguiu as orientações gerais expressas no Relatório Final da Fase 1 do EARAM tendo os respetivos projetos ficado a cargo de empresas de consultoria. Um aspeto importante do apoio da equipa do EARAM consistiu nas propostas de definição de critérios e metodologias gerais de caracterização hidrológica e de dimensionamento hidráulico. Um aspeto muito relevante, atendendo a que o escoamento gerado pela associação do caudal líquido com caudal sólido com uma elevada concentração de detritos com uma larga gama de dimensões, incluindo grandes blocos, tem um comportamento hidráulico muito diferente do correspondente aos escoamentos totalmente líquidos, exigindo por isso secções de vazão maiores e outras condicionantes específicas. A validação de metodologias de cálculo e dimensionamento mediante a comparação de resultados com a aplicação de um modelo computacional para simulação de escoamentos de misturas água- sedimentos (Nota Técnica D4 de Março de 2017) constitui um contributo relevante no avanço dos conhecimentos.

Na Figura 43 apresenta-se uma intervenção num trecho canalizado de ribeira na cidade do Funchal (ribeira de S. João) após o evento de 20 de fevereiro de 2010.



Figura 43 - Ribeira de S. João. Exemplo de intervenção após o evento de 20 de fevereiro de 2010.

7.3.2.3 *Medidas não estruturais*

7.3.2.3.1 - *Controlo da exposição ao risco*

A exposição constitui um dos fatores críticos na avaliação do risco e o respetivo controlo é uma das formas de gestão ou de mitigação mais relevantes. Com efeito, a diminuição da exposição de pessoas bens ao impacto direto de escoamentos e de movimentos de massa, através de medidas passivas de prevenção, reduz os danos potenciais associadas a hipotéticos eventos futuros.

O controlo da exposição aos riscos implica a possibilidade de locais alternativos para a ocupação humana e para a localização mais adequada de atividades económicas, sociais ou culturais. Em regiões muito montanhosas e de relevo muito agreste, como é o caso da ilha da Madeira, os condicionamentos a uma ocupação racional do território, tendo em conta todos os riscos existentes, são muito significativos: por um lado as encostas de elevado declive apresentam riscos geotécnicos de movimentos e de queda de blocos; por outro a ocupação de vales muito estreitos, sem planícies de cheia, acarreta um risco significativo de inundações e de escoamentos intensos. Na ilha da Madeira, a ocupação de cones de dejeção, em particular na parte terminal das ribeiras, é uma resposta histórica a este dilema.

O apoio aos processos de decisão que envolvem este tipo de risco pressupões o aprofundamento da avaliação e análise do risco nas diferentes bacias por forma a ser possível conhecer a distribuição espacial das vulnerabilidades associadas ao risco de aluviões. As orientações para controlo da ocupação permanente zonas do território suscetíveis de serem inundadas ou sujeitas aos impactos de aluviões devem ser

materializadas graficamente em mapas e catas de risco por forma a possibilitarem uma fácil perceção do perigo por parte dos cidadãos.

Para além dos instrumentos de planeamento na ocupação do território da responsabilidade de diversas entidades, há a referir a aplicação à ilha da Madeira do Decreto-Lei nº 115/2010 referente ao plano de gestão do risco de inundações, objeto do Capítulo 8. Com esta legislação é possível desenvolver para toda a ilha os seguintes elementos de gestão do risco de aluviões:

- Mapas de inundação e do risco, em particular nas zonas consideradas críticas. Estas cartas podem justificar a interdição total ou o condicionamento de construção de habitações em determinadas zonas críticas;
- Definição de critérios de ocupação de zonas perigosas o que pressupõe, nos casos em que uma maior redução do risco não seja socialmente justificável ou suportável, a aceitação condicionada de determinados tipos de ocupação desde que não se agrave o risco para jusante;
- Deslocação de infraestruturas e bens sensíveis que violem os critérios acima referidos e que não possam ser protegidas a um custo razoável.

Uma outra forma complementar de minimização da exposição, na previsão da ocorrência de um evento (aluvião ou cheia), é a implementação de sistemas de previsão e aviso que possibilitem a evacuação em tempo útil de zonas críticas expostas ao perigo. Estes sistemas poderão, no caso de serem eficazes, diminuir a vulnerabilidade dos cidadãos expostos ao perigo.

Contribuição do EARAM: no âmbito da Fase 2, a equipa do EARAM deu apoio às ações de aplicação da Diretiva de inundações da União Europeia (Decreto-Lei nº 115/2010), nomeadamente nos aspetos de preparação de metodologias para a elaboração do Caderno de Encargos para a obtenção de cartografia específica sobre risco de inundação para a ilha da Madeira, na modelação hidrológica com o fornecimento de dados para obtenção de hidrogramas de caudais líquidos com diferentes períodos de retorno, na validação das áreas de inundação (baseados em hidrogramas líquidos majorados por forma a ter em conta de modo aproximado os caudais sólidos) com a comparação de resultados, em alguns trechos selecionados de linhas de água, obtidos pela aplicação do modelo (STAV2D do IST). A equipa do EARAM deu apoio efetivo à empresa Município que teve a seu cargo a elaboração das cartas de inundação e de risco e o plano de gestão do risco associado a inundações.

7.3.2.3.2 – Rede integrada de monitorização, previsão e alerta de aluviões

Um sistema de previsão e aviso ou alerta precoce é um importante instrumento da gestão do risco. Este sistema permite a mobilização antecipada das autoridades

competentes e agentes da proteção civil e a preparação de avisos à população no caso de se justificar. No caso de ocorrência de um evento excepcional, o aviso antecipado às populações potencialmente em risco permite que estas sejam evacuadas temporariamente das áreas em exposição e que sejam ativados os dispositivos especiais de proteção civil que propiciem uma menor vulnerabilidade das populações ao impacto direto das enxurradas. Atualmente, existe um sistema de aviso meteorológico na ilha da Madeira em ligação com os serviços de proteção civil. O desafio é estudar uma forma coordenada de, eventualmente, melhorar a eficácia do sistema para aplicação às características das aluviões através da integração dos meios já existentes com os conhecimentos entretanto adquiridos no âmbito do EARAM e com outros meios de deteção e interpretação, mais potentes, que estão previstos para a Região.

Assim, preconiza-se a utilização dos seguintes meios do IPMA no dispositivo de previsão de aluviões: futuro radar meteorológico a instalar na ilha de Porto Santo (2017) e melhorias na modelação climática numérica (modelo AROME). A integração deve também incluir a rede hidrométrica da ilha. Esta deve ser objeto de uma racionalização, modernização e normalização.

A par destes meios há que potenciar os conhecimentos adquiridos do fenómeno das aluviões na ilha da Madeira, nomeadamente nos seguintes aspetos:

- Caracterização e tratamento consistente e completo da informação relativa a eventos ocorridos por forma a estabelecer correlações fiáveis entre as características das precipitações antecedentes e, face a um evento futuro, avaliar a possibilidade de ocorrência ou não de deslizamentos ou de mobilização de material sólido nos leitos das ribeiras (critérios ou indicadores de desencadeamento de aluviões);
- Desenvolvimento e calibração de modelos de simulação dos processos de precipitação e de propagação de escoamentos líquidos e sólidos, incluindo a previsão de caudais totais e de cotas máximas dos escoamentos em secções críticas;
- Monitorização e videovigilância do comportamento dos escoamentos em determinadas secções de linhas de água consideradas críticas.

Contribuição do EARAM: a equipa do EARAM promoveu a melhoria dos conhecimentos relativos à génese e transporte das aluviões com base no evento de 20 de fevereiro de 2010 e na aplicação de métodos de análise avançados nomeadamente a análise de dados hidrométricos (Nota Técnica e a utilização sistemática de imagens de satélite (Nota Técnica B1 de Julho de 2014).

Assim, foram desenvolvidas e ensaiadas várias abordagens baseadas na classificação por objetos em imagens de resolução espacial sub-métrica de forma a lidar com todo e qualquer tipo de deslizamento e a elaborar e actualizar rapidamente mapas de inventário de deslizamentos (Nota Técnica B2 de Dezembro de 2014).

Foram desenvolvidas e testadas diversas formas de identificar todos os objetos (ou regiões homogéneas) presentes nas imagens de satélite e efetuada a sua classificação em deslizamentos e não deslizamentos. Diferentes características dos métodos de segmentação (filtragem por tamanho e/ou intensidade) e vários tipos de descritores (espectrais e morfométricos) foram testados com diferentes classificadores (máxima verosimilhança, k-vizinhos mais próximos, máquinas de suporte vetorial (SVM)) e confrontados com a classificação clássica pixel a pixel, avaliando quantitativamente várias sequências metodológicas e parametrizações de forma a seleccionar a mais robusta e de melhor desempenho para ser utilizada na inventariação. A que conduziu a melhores resultados baseia-se na segmentação por objetos pela transformação 'watershed' e pelo classificador SVM. A transformação 'watershed', baseia-se em operadores da Morfologia Matemática, e para identificar os contornos das regiões homogéneas ou objetos existentes na imagem de satélite estabelece uma analogia com a inundação de uma superfície topográfica a partir de cada um dos seus mínimos locais. Tem a vantagem de não necessitar de ser parametrizada e de conduzir sempre a contornos fechados. O classificador SVM é um classificador binário que procura encontrar a fronteira de decisão ótima que é a que melhor separa os descritores do conjunto de dados em duas regiões no espaço das características, neste caso, correspondentes a deslizamentos e a não deslizamentos.

A sua aplicação na região-alvo na bacia do Funchal permitiu obter taxas de deteção das áreas dos deslizamentos superiores a 95%, superando claramente os métodos clássicos (Quadro 16).

Quadro 16 - Avaliação da classificação automática com a metodologia desenvolvida.

	Medidas de área de deslizamento corretamente detetada			
Região de validação	Exatidão global (%)	Índice Kappa	Falsos negativos (%)	Falsos positivos (%)
VAL1	98.2	0.8	17.5	20.8
VAL2	96.3	0.74	28.5	18.9

Os resultados obtidos de uma forma automática são excelentes, ao nível do que melhor se encontra na literatura científica da especialidade, com a particularidade de dizerem respeito a uma região muito heterogénea e complexa. A avaliação da validação em duas

regiões distintas (VAL1 e VAL2) permite identificar pequenas discrepâncias (valores distintos de falsos negativos, ou seja, de deslizamentos não identificados) que necessitam ainda de ser aperfeiçoadas, nomeadamente em vertentes que, no momento de passagem do satélite e da aquisição da imagem, apresentam uma exposição solar significativamente menor relativamente à da maioria das outras superfícies. Não se trata de um problema significativo, mas as soluções que pretendemos introduzir brevemente, traduzir-se-ão num pequeno aumento do desempenho global da metodologia.

A fase seguinte consistiu na validação da metodologia aplicando-a a toda a ilha na deteção de deslizamentos em épocas passadas. Para efetuar o cálculo de volumes dos deslizamentos, desenvolveu-se um conjunto de rotinas para o ENVI5, recorrendo ao software '*DEM feature extraction*'.

A utilização das técnicas avançadas de interferometria radar na monitorização das áreas construídas no concelho do Funchal-Madeira, visa a determinação de deslocamentos verticais de pontos dispersores, geralmente correspondentes a elementos construídos pelo Homem, para identificação e análise de zonas instáveis, a partir de imagens de satélite de radar de abertura sintética.

As imagens utilizadas no processamento foram disponibilizadas pela Agência Espacial Europeia (ESA) e foram adquiridas pelo sensor ENVISAT (banda C) no período correspondente a março de 2004 – junho de 2010. O estudo iniciou com a identificação das diversas técnicas interferométricas mais adequadas ao objeto de estudo tendo sido testada a técnica SBAS. No pré-processamento interferométrico foi utilizado um modelo digital do terreno com célula de 90 m, disponibilizado pela NASA, e foram apenas consideradas no processamento os interferogramas com base normal inferior a 50% da base crítica e base temporal inferior a 500 dias. A área processada corresponde a uma área de 20 km x 20 km para garantir uma boa estimativa do efeito atmosférico, foram eliminados os interferogramas que apresentavam ruído na zona do Funchal, para que o resultado final fosse o mais robusto possível para toda a área geográfica em estudo e assumido, numa primeira fase, o modelo linear dos deslocamentos.

Com este tipo de análises foi aplicada à ilha da Madeira uma metodologia para inventariação automática e rápida dos deslizamentos de vertentes ocorridos durante um evento e avaliação do respetivo material sólido produzido.

Com base na sistematização dos conhecimentos foi possível elaborar mapas de perigosidade de deslizamento e estimativas de volumes de deslizamento bem como cartas de erosividade da precipitação e de erodibilidade dos solos (Capítulos 4 e 5).

Para apoio na implementação da Diretiva (Capítulo 8) de inundações da União Europeia (Decreto-lei nº 115/2010) e, em particular, na caracterização probabilística de precipitações excecionais. (Nota Técnica D2 de Abril de 2015). Com base nas

características das bacias hidrográficas das 27 zonas críticas identificadas na RAM, com exceção da Ribeira do Tanque que se localiza em Porto Santo, determinaram-se os valores de caudal de ponta de cheia relativos aos períodos de retorno de 20, 50, 100 e 500 anos.

Os hietogramas de projeto foram calculados a partir de mapas de precipitação diária máxima anual para os períodos de retorno de 20, 50, 100 e 500 anos obtidos por interpolação por co-krigagem de estimativas pontuais da precipitação em 66 estações. Os valores pontuais da precipitação diária máxima anual para os vários períodos de retorno foram estimados pela análise dos máximos anuais dos registos de 44 estações, com mais de 29 anos de dados, e pela análise das séries de duração de parcial de 12 estações, com registos entre 10 e 20 anos de dados. No primeiro caso, aplicou-se a função de distribuição de probabilidades generalizada de extremos (GEV) de distribuição, na sequência da avaliação do ajustamento aos registos observados pelas distribuições log-normal de dois parâmetros (lei de Galton), log-normal de três parâmetros, generalizada de extremos (Generalized Extreme Values, GEV), Gumbel (GEV tipo I), Pearson tipo III e a log-Pearson tipo III.

No que respeita a modelação computacional do transporte de escoamentos mistos de água e sedimentos característicos das aluviões que ocorrem na ilha da Madeira foi desenvolvido e calibrado um modelo avançado designado por STAV 2D (Nota Técnica D4 de Março de 2017). Este modelo hidrodinâmico e morfológico bidimensional (em planta) STAV2D (desenvolvido pelo CERIS-IST) foi calibrado e validado para ser aplicado nas vertentes sul e leste da ilha da Madeira. Recorrendo a este modelo pretende-se apoiar os estudos de intervenção nas ribeiras da ilha da Madeira. No Capítulo 6 descreve-se com mais pormenor a capacidade acrescida de modelação hidráulica de aluviões conseguida o desenvolvimento deste modelo.

A concretização de um sistema integrado mais eficaz de previsão e alerta de aluviões constituirá o contributo mais relevante do EARAM (Capítulo 10).

A equipa elaborou propostas para a arquitetura do sistema de previsão e alerta de aluviões (Nota Técnica A3 de julho de 2015, com atualizações em 2016). A componente do sistema de previsão da precipitação inicia-se com a recolha de informação de redes de monitorização (A), radar meteorológico (B) e modelos de previsão meteorológica (C). O cruzamento e o processamento destas fontes de informação deverão produzir, com uma antecedência de algumas horas, mapas de precipitação horária. As projeções de precipitação são confrontadas com critérios de pré-estabelecidos de definição dos limiares de deslizamentos de vertentes para identificar níveis de alerta (H). Estes critérios foram desenvolvidos pelo IST no âmbito do EARAM e relacionam níveis de alerta com valores acumulados de precipitação e valores de precipitação num período recente. Não sendo incluída nestes critérios qualquer informação sobre geomorfologia,

solo ou vegetação, os níveis de alerta identificados são apenas função da precipitação. No entanto, o cruzamento dessa informação com o mapa de zonas com potencial para o deslizamento, elaborados a partir da referida análise conjunta de imagens de satélite e de outra informação geográfica, permite espacializar os alertas em função da geomorfologia, solo e vegetação do terreno e estimar os volumes de material sólido afluentes às linhas de água.

O cálculo das zonas inundadas e afetadas é realizado por um modelo de simulação hidráulica bifásica que as calcula a partir das previsões da precipitação e de afluência de caudal sólido. Esse modelo foi desenvolvido pelo IST e é objeto de atualização e melhoria permanente. A sua operação exige meios computacionais e conhecimentos específicos, pelo que será necessário encontrar um modo de funcionamento adequado.

Após a interpretação, automática ou não, dos resultados deve ser emitido o nível de alerta adequado ao Serviço Regional de Proteção Civil (L) que se encarregará de avisar a população afetada, acompanhar a situação de emergência e mobilizar os meios de socorro (M).

Assim, os principais objetivos propostos pela equipa do EARAM podem ser resumidos do seguinte modo:

- Monitorização e recolha de informação continuada sobre a precipitação e o comportamento das bacias hidrográficas no que respeita instabilidades e deslocamentos de material sólido.
- Tratamento consistente da informação recolhida nas redes de monitorização existentes por forma a consolidar ou melhorar a fiabilidade dos critérios de possibilidade de ocorrência de eventos integrando diversos fatores intervenientes.
- Monitorização, observação e análise de processos de transporte e de retenção de aluviões em estruturas ou bacias equipadas para o efeito contribuindo para a melhoria do conhecimento do fenómeno.
- Colaboração na calibração de modelos de simulação de escoamentos de aluviões (mistura de água e sólidos) para previsão de caudais e cotas máximas de inundação em secções críticas.
- Implementação de critérios operacionais de desencadeamento de avisos ou alertas precoces para a proteção civil tendo em conta a integração de diferentes tipos de redes de deteção e monitorização.

7.3.2.3.3 - Redes de monitorização

Atualmente, a rede de monitorização da precipitação da ilha da Madeira é constituída por três conjuntos de estações que são geridas por entidades distintas: IGA

(Investimentos e Gestão da Água, SA), LREC (Laboratório Regional de Engenharia Civil) e IPMA (Instituto Português do Mar e Atmosfera). A Nota Técnica A2 de Abril de 2016 apresenta uma descrição pormenorizada das redes de monitorização da precipitação na ilha Madeira e abrange os seguintes tópicos:

- Caracterização pormenorizada da rede de monitorização de precipitação da ilha da Madeira através da criação de uma ficha de identificação para cada estação;
- Identificação e organização dos registos existentes de precipitação;
- Identificação de dados em falta.

No âmbito da implementação do sistema de previsão e alerta de aluviões será necessário rever esta rede de monitorização e coordenar os esforços empreendidos pelo IGA, LREC e IPMA. Deverão ser analisadas as possíveis redundâncias entre os vários conjuntos de estações e as eventuais lacunas na monitorização da distribuição espacial da precipitação. É ainda necessário definir e atribuir diferentes níveis de operacionalidade a cada estação, com o respetivo tempo de resposta em caso de avaria. Esta análise deverá determinar níveis de redundância adequados para assegurar o funcionamento, em cada momento, de um conjunto adequado de estações.

No caso das estações a cargo de instituições regionais, deverá ser equacionada a coordenação das redes do LREC e da IGA ou a partilha das estruturas de manutenção das estações, de modo a reduzir os custos totais de operação. O tratamento da informação deverá ser consistente com os critérios empíricos desenvolvidos para determinação de níveis de alerta.

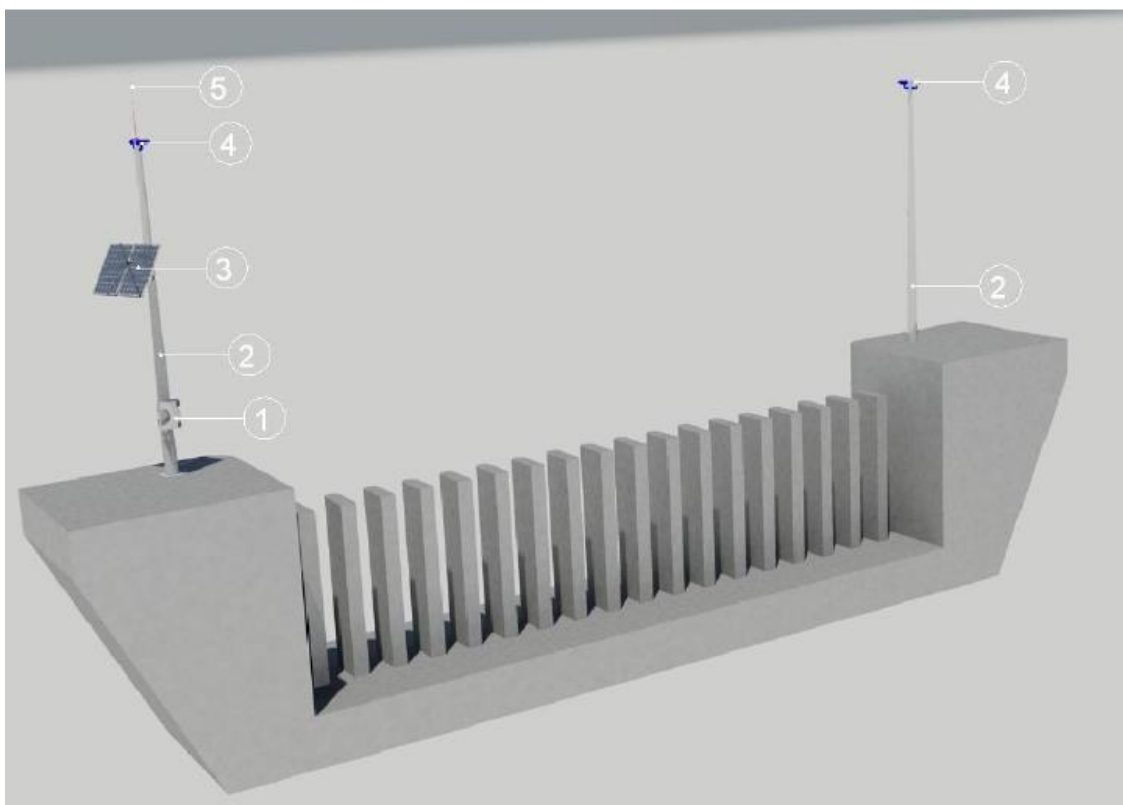
A forma tradicional de estimar caudais de escoamentos líquidos através da medição direta dos níveis hidrométricos por limnímetros e posterior cálculo do caudal, através de curvas de vazão, apresenta enormes dificuldades em cursos de água torrenciais e a ocorrência de aluviões, como é o caso das ribeiras da Madeira. Em situações de cheia, o nível da água sobe substancialmente e os aparelhos são frequentemente levados pela corrente, perdendo-se o equipamento e as medições. A ocorrência de desprendimentos e arrastamentos de blocos rochosos podem também obstruir as secções de medição e alterar as suas curvas de vazão que relacionam o nível hidrométrico e o caudal.

Estas condições levaram a equipa do EARAM a investigar formas indiretas de medição do caudal, em que os aparelhos estão instalados em locais mais afastados da corrente. A utilização de medidores de nível à distância, câmaras de vídeo, de geofones e de acelerómetros é objeto de teste e investigação em diversos locais do mundo com problemas semelhantes aos da ilha da Madeira. A camara pode permitir medir o nível de escoamento em réguas hidrométricas ou servir para medir da velocidade superficial

das aluviões. O ruído e a vibração associado às aluviões podem ser medidos por geofones ou acelerómetros, consoante a frequência da vibração.

No âmbito do projeto MonitorizaRibeiras, a cargo do LREC, estas tecnologias estão a ser testadas em quatro ribeiras da vertente sul da Ilha da Madeira: Ribeira Brava, São João, Santa Luzia e João Gomes. Este sistema é constituído por: 12 udógrafos, 32 câmaras de vídeo, 4 sensores de nível ultrassónicos, 4 sensores de nível com tecnologia radar e 10 sensores de vibração (3 acelerómetros e 7 geofones). É também objetivo do projeto MonitorizaRibeiras a monitorização do desempenho das estruturas de retenção de sedimentos, construídas na sequência do evento de fevereiro de 2010.

Na Figura 44 apresenta-se um esquema tipo de instalação de sensores numa estrutura de retenção de material sólido (elaborado pela empresa Aqualogus no âmbito do projeto de reconstrução e regularização da ribeira de São João, 2014).



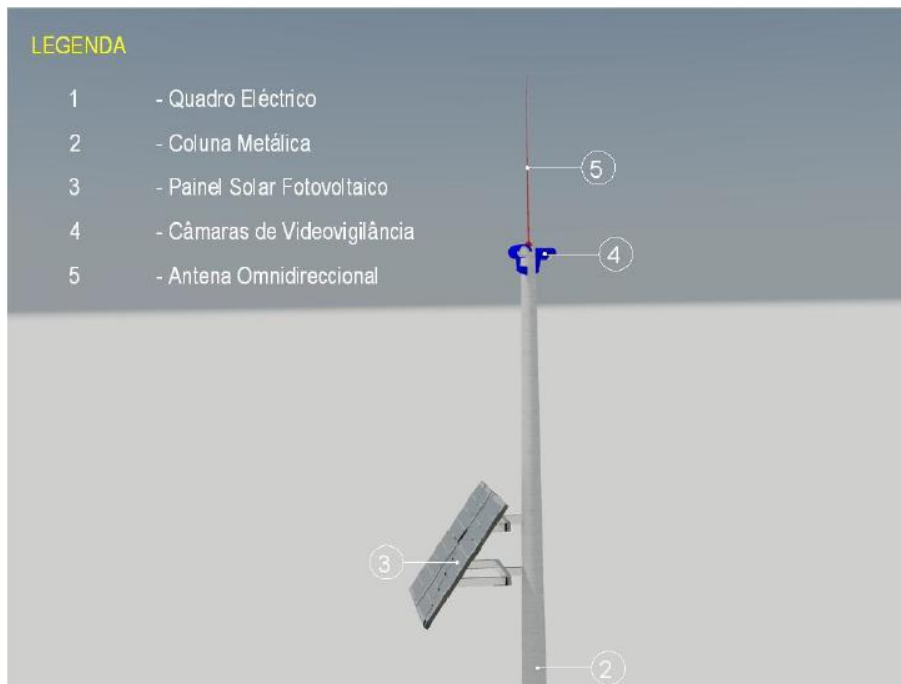


Figura 44 – Esquema tipo de instalação de sensores numa estrutura de retenção de material sólido (Aqualogus, 2014).

Este projeto está numa fase piloto e tem como principal objetivo a avaliação e a seleção das melhores metodologias para medição de caudais. Nas fases subsequentes do projeto, as metodologias selecionadas deverão ser aplicadas a outros locais. As medições de caudal permitirão aferir os resultados dos modelos hidrológicos e hidráulicos em desenvolvidos e melhorar o desempenho dos modelos inseridos no sistema de previsão e alerta de aluviões. Em situações de emergência, as estações de monitorização permitirão também acompanhar o desenrolar dos acontecimentos em secções críticas da rede hidrográfica e integrar o sistema de aviso e alerta de aluviões.

7.3.2.3.4 - Fatores sociopsicológicos de proteção em populações expostas ao risco

Num plano de gestão do risco, a dimensão social é muito relevante, nomeadamente no que refere à perceção social do risco da população. Com efeito a forma como a população encara o perigo e a avaliação que faz do respetivo grau de ameaça condiciona a capacidade de autoproteção e de controlo da respetiva exposição e vulnerabilidade. Por seu turno, a resiliência social a eventos catastróficos, depende também das redes sociais de suporte.

A equipa do EARAM incluiu na Fase 2 uma componente de estudos de campo neste domínio (Capítulo 10 e Notas Técnicas E1 e E2). Com este estudo pretendeu-se conhecer e compreender a perceção de risco de perigos naturais dos indivíduos na Região Autónoma da Madeira (RAM), caracterizando neste sentido a vulnerabilidade social, e avaliar a resiliência, procurando neste âmbito caracterizar a rede social pessoal dos indivíduos face a situações de risco e emergência.

A amostra do estudo foi constituída por população urbana e rural diretamente exposta às aluviões e população não diretamente exposta às aluviões, num total de 792 indivíduos.

Os resultados evidenciam que os indivíduos se preocupam com os perigos naturais e com a probabilidade de serem afetados ocorrência, evidenciando uma consciência do risco de perigos naturais a que estão expostos. Contudo, verificou-se que apesar de estarem conscientes dos riscos a maioria dos indivíduos não tem determinadas medidas de autoproteção.

Constatou-se uma relação entre a perceção de risco de perigos naturais e a rede de suporte social, no sentido em que quanto maior a rede de suporte social, menor a perceção de risco de aluviões.

Da análise global dos resultados, pode considerar-se que os indivíduos da amostra se manifestaram preocupados com os perigos naturais e também com a probabilidade de serem por eles afetados, o que pode ser interpretado como estando conscientes dos riscos naturais a que estão expostos.

A maioria dos indivíduos considera-se informado e muito informado sobre os perigos naturais a que estão expostos no local onde vivem, as medidas para se proteger dos perigos naturais, os perigos de aluvião a que estão expostos no local onde vivem, a quem pedir ajuda na ocorrência de uma aluvião e o significado dos avisos meteorológicos, evidenciando deste modo uma perceção elevada do grau de informação.

As campanhas de informação/sensibilização devem ter como objetivo não apenas informar e sensibilizar a população para a problemática dos riscos naturais mas também promover a participação ativa dos cidadãos criando um sentido de responsabilidade e pertença à comunidade, proporcionando um espaço em que possam sentir-se ouvidos, em que possam expor as suas opiniões e preocupações e em que possam sentir que aquilo que pensam é válido e tido em conta pelos especialistas da área e pelas entidades politico/administrativas. Neste sentido, é fundamental adequar a linguagem dos especialistas à população colocando os termos técnicos, como por exemplo aluvião, numa linguagem coloquial, como por exemplo enxurrada.

Uma vez que os indivíduos evidenciam um nível elevado de confiança em entidades que prestam auxílio em situações de risco e emergência é importante que futuras campanhas de sensibilização/intervenção sejam efetivadas em parceria com estas entidades de modo a que a população seja o mais recetiva possível.

Considerando que o capital social afigura-se crucial em situações de risco e emergência, e tendo em conta que a rede de suporte social da maioria dos indivíduos do presente estudo é pequena e constituída sobretudo por membros familiares, considera-se importante criar redes de suporte social, nas quais se incluam técnicos e instituições

públicas e privadas, que estejam preparados para prestar apoio em situações de risco e emergência aos indivíduos, capacitando deste modo a comunidade para prever e enfrentar os riscos naturais.

8 Aplicação da Diretiva das Inundações à Ilha da Madeira

8.1 Enquadramento

A Diretiva nº 2007/60/CE, de 23 de outubro, estabeleceu o quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações tendo em vista a redução das consequências associadas na União Europeia. Em 2010, esta Diretiva foi transposta para o direito nacional, através do Decreto-Lei nº 115/2010, de 22 de outubro. De acordo com o respetivo preâmbulo, este Decreto-Lei pretende ser uma ferramenta para estabelecer prioridades e para tomar decisões técnicas, financeiras e políticas em matéria de gestão dos riscos de inundações. Pretende também responder à necessidade de se dispor, a nível nacional, regional, e local, de informação rigorosa e eficaz acerca dos riscos de inundações.

O Decreto-Lei nº 115/2010 abrange todo o território nacional nomeadamente a Região Autónoma da Madeira. De um modo geral, compete às Administrações das Regiões Hidrográficas (ARH), com o apoio da Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC) e do Instituto Geográfico Português (IGP), a implementação dos instrumentos de avaliação e gestão dos riscos de inundações indicados no referido Decreto-Lei.

No relatório final da Fase1 do EARAM, refere-se que os instrumentos de planeamento e as medidas não estruturais de mitigação do risco de inundação ou de defesa contra as aluviões inserem-se na filosofia da Diretiva da União Europeia e do Decreto-Lei nº 115/2010. Com efeito, este Decreto-Lei pode ser um suporte adequado para a implementação gradual das medidas propostas em zonas identificadas como muito vulneráveis ou críticas aos efeitos das aluviões. Nesse relatório declara-se, contudo, que se impõe um criterioso trabalho de adaptação dos procedimentos normativos às características das bacias hidrográficas da ilha da Madeira, ao tipo de cheias (aluviões) e de cursos de água e ao tipo de ocupação do solo.

Na Fase 2 do referido estudo, que teve início em 2014, envolvendo um conjunto mais amplo de instituições da Região Autónoma da Madeira, o respetivo plano de trabalhos incluía uma tarefa específica: a definição de metodologias específicas para aplicação da Diretiva Comunitária sobre a gestão do risco de cheias e inundações. Esta tarefa, foi desenvolvida com a colaboração da Secretaria Regional do Ambiente (Direção Regional do Ambiente).

De acordo como referido Decreto-Lei, o Estado deve providenciar a elaboração dos seguintes instrumentos de gestão do risco:

- Cartas das zonas inundáveis para áreas de risco;
- Cartas de risco de inundações;
- Planos de gestão do risco de inundações.

Na ilha da Madeira, as inundações mais relevantes estão associadas a aluviões. Este tipo de cheias tem características que dificultam o respetivo controlo, a saber:

- Cheias rápidas resultantes de precipitação intensa eventualmente acompanhada pelo transporte de material sólido em bacias com elevado declive e com depósitos de sedimentos mobilizáveis;
- Tempos de concentração das bacias muito reduzidos e dificuldade de previsão das ocorrências;
- Impacto das cheias com efeitos devastadores em resultado das características dos sedimentos transportados;
- Capacidades de vazão das linhas de água reduzidas e áreas de inundação mais significativas atendendo às elevadas concentrações de sedimentos sólidos com grandes dimensões.

O correto ordenamento do território, tendo em consideração o risco de inundações resultantes de aluviões e as condições físicas e socioeconómicas da Região, constitui um desafio na aplicação do Decreto-Lei nº 115/2010 na ilha da Madeira e na gestão do risco de inundações.

Para essa aplicação, a Secretaria Regional do Ambiente, através da DROTA, selecionou 27 zonas críticas em 10 concelhos da ilha da Madeira e no concelho de Porto Santo. O critério de seleção baseou-se nos registos históricos de ocorrências de cheias e inundações, dos danos associados e das intervenções realizadas nas linhas de águas.

Em 2016, a Empresa Muncíпия ficou com o encargo de fornecer as cartas de inundação e os planos de gestão dos riscos de inundações da Região Autónoma da Madeira (PGRI-RAM).

8.2 Aspetos principais a ter em conta

Na adaptação do Decreto-Lei à Região Autónoma da Madeira (RAM) foi proposta pela equipa do EARAM a consideração dos seguintes aspetos principais:

- Características específicas das cheias (aluviões) e dos cursos de água da ilha da Madeira.
- Caracterização da perigosidade (probabilidades e intensidade) das precipitações e das aluviões e consequentes áreas potencialmente inundáveis.
- Conhecimentos científicos atualizados referentes à propagação das aluviões.
- Qualidade dos dados históricos referentes a cheias (aluviões) e inundações, nomeadamente danos e perdas.

- Características da ocupação dos vales e das zonas inundáveis e as condicionantes geográficas e socioeconómicas associadas na definição de medidas de controlo da exposição ao risco de inundações e aluviões.
- Elementos de base, nomeadamente cartografia, ou de apoio, disponíveis na RAM para a implementação do Decreto-Lei.

8.3 Contribuições do EARAM para a aplicação do Decreto-Lei nº 115/2010

No âmbito das atividades do EARAM (Fase2) no apoio à aplicação do Decreto-Lei nº 115/2010 salientam-se as seguintes ações:

1. Proposta de metodologia para a elaboração do Caderno de Encargos para a obtenção de cartografia específica sobre risco de inundação para a ilha da Madeira. De entre os aspetos identificados associados ao articulado do Decreto-Lei na sua aplicação à Região sublinham-se os seguintes:
 - Introdução da definição de “aluvião” (artigo 2º).
 - Cartas de zonas inundáveis para áreas de risco. Definição dos cenários associados a períodos de retorno de precipitações. Introdução de cenários de inundação decorrentes de cheias totalmente líquidas e de aluviões (com caudal sólido significativo). Consideração de hidrogramas líquidos e sólidos para diferentes zonas críticas (artigo 8º).
 - Planos de gestão dos riscos de inundações. Adaptação consistente tendo em conta as especificidades da Região (artigo 9º).
 - Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (artigo 11º). Adaptação tendo em conta o programa em curso Monitorização Ribeiras (LREC e DROTA) e o desenvolvimento Fase 2 do EARAM.
2. Apoio na modelação hidrológica com o fornecimento à Empresa Municípa de dados para obtenção de hidrogramas de caudais líquidos com diferentes períodos de retorno.
3. Apoio na validação das áreas de inundação obtidas pela Municípa (hidrogramas líquidos majorados por forma a ter em conta de modo aproximado os caudais sólidos) com a comparação de resultados, em alguns trechos selecionados de linhas de água, obtidos pela aplicação do modelo (STAV2D do IST).
4. Apoio na apreciação geral da versão 1.0 do PGRI-RAM elaborada pela Municípa.

A determinação correta de áreas inundáveis para diferentes períodos de retorno é uma componente muito sensível da aplicação do Decreto-Lei 115/2010 na ilha da Madeira.

Com efeito, os períodos de retorno associados à precipitação (20, 100 e 500 anos) não correspondem aos períodos de retorno associados as ocorrências e intensidades de aluviões em cada bacia hidrográfica e nos locais de impacto mais crítico. Esta indeterminação não é passível de remédio atendendo à carência de dados históricos suficientes.

Relativamente aos efeitos da dinâmica específica da mistura líquida e sólida na extensão das áreas inundáveis salientam-se alguns aspetos relevantes relativos a validação dos resultados computacionais (Nota Técnica D4 de Março de 2017).

De acordo com o estudo de comparação dos resultados da Municíпия (2016), nas bacias hidrográficas da cidade do Funchal e de Machico, com os resultados obtidos com o modelo STAV2D que tem em consideração o transporte de material sólido (aluviões) obtiveram-se as conclusões:

No cenário de escoamento da aluvião, a severidade dos escoamentos nas ribeiras que afluem ao Funchal é significativamente superior à de uma cheia de água limpa com o mesmo volume transportado de água.

Verifica-se que, em geral, a inundação prevista pela equipa do EARAM é mais extensa que a obtida em Municíпия (2016), o que se justifica pelo caudal de ponta mais elevado e pelas alterações morfológicas resultantes do transporte sólido. Nas zonas urbanas da Baixa do Funchal a diferença é significativa. Note-se ainda que há linhas de água não estudadas em Municíпия (2016) onde podem ocorrer inundações significativas.

Na Ribeira de Santa Luzia registam-se também diferenças significativas entre a envolvente máxima calculada no Cenário considerado e a inundação calculada por Municíпия (2016). Na Ribeira de João Gomes as diferenças são ainda perceptíveis, mas menos relevantes do que na zona urbana na baixa do Funchal. Nesta bacia, o volume de material sólido gerado nas encostas, relativamente ao volume de escoamento líquido, é inferior ao das restantes ribeiras. Como consequência, o coeficiente de majoração (razão entre caudais de ponta da mistura e de água limpa) desta ribeira é o mais reduzido das ribeiras do Funchal, o que justifica a menor extensão da envolvente de inundação máxima calculada neste estudo, em algumas zonas menor que a extensão da inundação calculada em Municíпия (2016). No entanto, note-se que há linhas de água não estudadas em Municíпия (2016) sujeitas a inundações relevantes.

Concluiu-se, assim, que a simulação nas condições do cenário de propagação de água e de sedimentos ou detritos apresenta caudais de ponta entre 1,3 e 3,7 vezes superiores aos obtidos com água limpa para as ribeiras do Funchal.

Este aumento do caudal de ponta é uma consequência de efeitos inerciais associados às elevadas concentrações de sedimentos transportados. O efeito é conhecido e descrito na bibliografia de “debris flows” (aluviões). Conclui-se que se forem expectáveis

movimentos de massa nas encostas o caudal de ponta de cheia não deverá ser calculado pelos métodos tradicionais, mas sim determinado pela aplicação de um modelo hidrodinâmico e morfológico aplicado às sub-bacias onde se regista a produção de sedimentos. A metodologia empregue em Municípa (2016) pode conduzir a consideráveis subestimações do caudal de ponta de cheia e, conseqüentemente, à subestimação da exposição à aluvião.

Dada a incerteza na determinação dos volumes de material sólido decorrentes da instabilização das encostas, recomenda-se que o caudal de ponta de cheia seja majorado por um factor não inferior a 3 nas ribeiras do vertente sul da Madeira, no caso de se recorrer a simulações aplicáveis para água limpa.

As simulações realizadas em regime variável por um modelo bi-dimensional, com leito móvel e transporte sólido, conduzem a áreas de inundação substancialmente superiores às obtidas por simulações produzidas com um modelo unidimensional, em regime permanente e leito fixo, sempre que a quantidade de material sólido mobilizada nas encostas é significativa. Este é o caso das Ribeiras de São João e Santa Luzia. Na Ribeira de João Gomes as diferenças são menos significativas e na ribeira que atravessa o Machico, não havendo produção significativa de sedimentos, o modelo unidimensional conduz, em algumas zonas, a maiores áreas inundadas. Recomenda-se, sendo expectáveis elevados volumes de material sólido, a simulação dos impactes da aluvião seja feita de acordo com a geração conjunta de escoamento de água e material sólido e propagação em regime variável por um modelo bidimensional em planta.

9 Sistema de previsão e alerta de aluviões

Os sistemas de previsão e de alerta precoce de situações de emergência assumem um papel muito relevante na disponibilização dos níveis de proteção que as restantes medidas não têm a possibilidade de oferecer. É assim imperativo desenvolver um sistema com capacidade para i) prever e avaliar as situações de emergência em tempo real; ii) emitir alertas às entidades competentes, sempre que se preveja que a segurança de pessoas, bens ou atividades desenvolvidas poderão estar em causa; e iii) acompanhar as situações de emergência, proporcionando as informações necessárias ao empenhamento dos meios de socorro.

A natureza repentina, rápida e de conteúdo de material sólido das aluviões madeirenses coloca, no entanto, desafios muito particulares na conceção de um sistema de previsão e alerta. Este documento discute estes constrangimentos e propõe uma arquitetura que os procura ultrapassar.

O sistema de previsão e alerta precoce de aluviões deve ter a capacidade para prever a ocorrência deste tipo de fenómenos complexos, que envolvem diversos processos hidrogeológicos, com um tempo de antecedência suficiente para permitir o abrigo das populações afetadas e a mobilização das equipas de prevenção e socorro. Deve ainda indicar uma área de abrangência do risco adequada à emissão de alertas específicos que promovam uma reação concreta de autoproteção por parte das populações

A concretização destes objetivos é dificultada pela variabilidade espacial de condições geológicas, morfológicas e hidrometeorológicas da ilha da Madeira e pela natureza repentina, rápida e de conteúdo de material sólido das aluviões.

A variabilidade espacial das condições hidrometeorológicas obriga à existência de uma rede meteorológica densa que forneça observações pontuais da precipitação, complementada pela operação de um radar meteorológico que proporcione estimativas da distribuição espacial da precipitação. São necessários estes dois tipos de instrumentos de monitorização porque as estimativas do radar meteorológico carecem de validação e calibração no terreno.

A natureza mista do fenómeno das aluviões, com uma componente líquida e outra sólida, determina a necessidade de incluir no sistema módulos de previsão do desencadeamento de deslizamentos de vertentes, de quantificação da afluência do material sólido às linhas de água e de simulação da sua mobilização, transporte e deposição pelo escoamento.

A rapidez com que estes fenómenos ocorrem, após o início da precipitação, exige a inclusão de módulos de previsão da precipitação, por forma a aumentar a antecedência dos alertas emitidos. A previsão da precipitação poderá ser conseguida recorrendo aos modelos de previsão meteorológica utilizados pelo Instituto Português do Mar e da

Atmosfera (IPMA) ou por um modelo de previsão do movimento das áreas de precipitação observadas no radar.

Finalmente, a complexidade de todos os fenómenos naturais associados às aluviões e os erros associados às previsões e estimativas das áreas afetadas recomenda uma monitorização no terreno através de estações de vigilância e controlo colocadas ao longo das ribeiras. Em tempo de emergência estas estações permitem aferir as previsões e realizadas e fornecem informação relevante para o acompanhamento da situação e mobilização dos meios de socorro. Em tempo de paz, os dados das estações permitem calibrar e aperfeiçoar os modelos e melhor as previsões a realizar numa seguinte situação de emergência.

A Figura 45 apresenta uma proposta para a arquitetura do sistema de previsão e alerta de aluviões. A leitura da figura deve ser realizada de cima para baixo com a recolha de dados sobre precipitação, com a corrida de modelos matemáticos e com a aplicação de outros instrumentos de previsão até à emissão dos alertas.

A componente do sistema de previsão da precipitação inicia-se a recolha de informação de redes de monitorização (A), radar meteorológico (B) e modelos de previsão meteorológica (C). O cruzamento e o processamento destas fontes de informação deverão produzir, com uma antecedência de algumas horas, mapas de precipitação horária prevista para um horizonte de 12 a 24 horas, com uma resolução espacial da ordem de 1x1 km. Recomenda-se que esta tarefa fique acometida ao IPMA.

As projeções de precipitação são confrontadas com critérios de pré-estabelecidos de definição dos limiares de deslizamentos de vertentes para identificar níveis de alerta (H). Estes critérios foram desenvolvidos pelo IST no âmbito do EARAM2 e relacionam níveis de alerta com valores acumulados de precipitação e valores de precipitação num período recente. Não sendo incluída nestes critérios qualquer informação sobre geomorfologia, solo ou vegetação, os níveis de alerta identificados são apenas função da precipitação. No entanto, o cruzamento de dessa informação com o mapa de zonas com potencial para o deslizamento (J), em elaboração pelo IST a partir da análise conjunta de imagens de satélite e de outra informação geográfica (I), permite espacializar os alertas em função da geomorfologia, solo e vegetação do terreno e estimar os volumes de material sólido afluentes às linhas de água. O LREC deverá assumir a responsabilidade pela operacionalização e manutenção destes processos, com base nos elementos produzidos pelo ERAM2.

O cálculo das zonas inundadas e afetadas é realizado por um modelo de simulação hidráulica bifásica que as calcula a partir das previsões da precipitação e de afluência de caudal sólido (K). Esse modelo foi desenvolvido pelo IST e é objeto de atualização e melhoria permanente. A sua operação exige meios computacionais e conhecimentos específicos, pelo que será necessário encontrar um modo de funcionamento adequado.

O LREC deverá interpretar os resultados do modelo e emitir o alerta ao Serviço Regional de Proteção Civil (L) que se encarregará de avisar a população afetada, acompanhar a situação de emergência e mobilizar os meios de socorro (M).

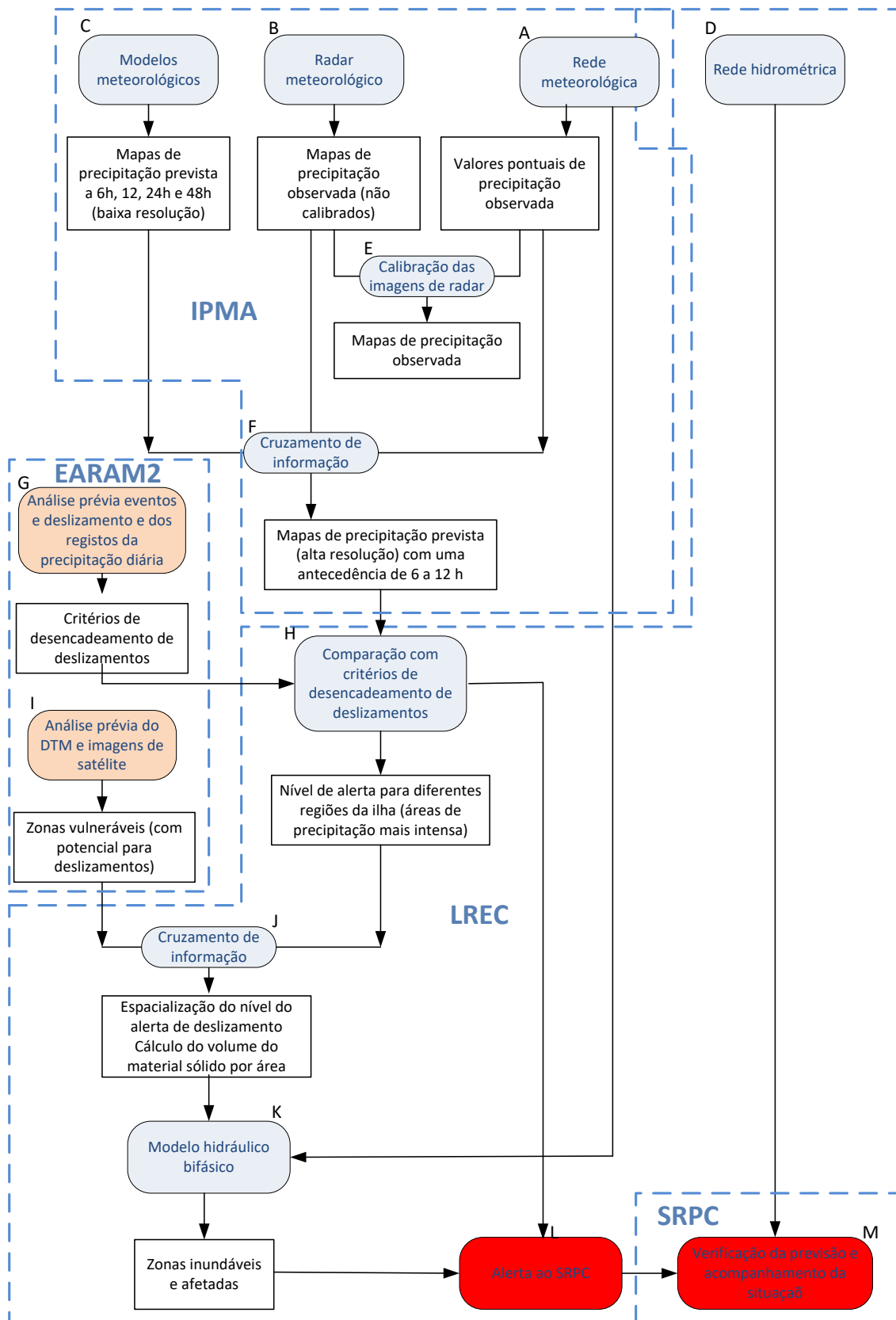


Figura 45 – Proposta de arquitetura do sistema de previsão e alerta de aluviões

A dimensão e complexidade do sistema recomenda a sua concretização de forma faseada e a distribuição de responsabilidades, consoante as competências das várias entidades, nacionais e regionais, que estarão necessariamente envolvidas. O documento apresenta uma primeira proposta de partilha de responsabilidades.

10 Condicionalismos sociais

10.1 *Aspetos gerais*

Com o presente estudo pretendeu-se conhecer e perceber a perceção de risco de perigos naturais dos indivíduos na Região Autónoma da Madeira (RAM), caracterizando neste sentido a vulnerabilidade social, e ainda compreender a rede social pessoal dos indivíduos face a situações de risco e emergência.

A amostra ficou constituída por 792 indivíduos, de zonas urbanas e rurais, direta e não diretamente expostos a aluviões. Utilizaram-se os seguintes instrumentos: Questionário de Perceção de Risco de Aluvião: RAM (construído para o efeito) e IARSP - Instrumento de Análise da Rede Social Pessoal (Alarcão & Sousa, 2007).

Os resultados evidenciaram que os indivíduos se preocupam com os perigos naturais e com a probabilidade de serem afetados, manifestando uma consciência do risco de perigos naturais a que estão expostos. Contudo, verificou-se que apesar de estarem conscientes dos riscos a maioria dos indivíduos não tem determinadas medidas de autoproteção.

Constatou-se uma relação entre a perceção de risco de perigos naturais e a rede de suporte social, no sentido em que quanto maior a rede de suporte social, menor a perceção de risco de aluviões.

10.2 *Enquadramento teórico*

A ilha da Madeira tem sido atingida ao longo dos anos por vários perigos naturais sendo mais frequentemente descritos e documentados as aluviões, sismos e escorregamentos (Rodrigues, 2005). As aluviões são movimentos de vertente provocados pela água com transporte de materiais sólidos em quantidades elevadas (França, 2014) que podem ocorrer quando a taxa de infiltração é baixa e chove intensamente durante curtos períodos de tempo. Comportam um risco elevado pois ocorrem muito repentinamente, sem tempo de alerta (Sepúlveda, 2011).

Em 1803 a região foi atingida pela maior aluvião até à data, com uma taxa mortal estimada entre 600 e 1000 indivíduos (Rodrigues, 2005), e em 2010 foi novamente atingida por uma aluvião que foi considerada a catástrofe hidrometeorológica mais fatal no território português nas últimas quatro décadas (Fragoso, Trigo, Pinto, Lopes, Lopes, Ulbrich, & Magro, 2012). Esta aluvião originou 45 mortos, 6 desaparecidos, vários feridos e desalojados e danos avaliados em 1,3 mil milhões de euros (Sepúlveda, 2011).

Refira-se que o Município do Funchal é a zona geográfica da região em que ocorreu até à data maior número de eventos perigosos, seguindo-se os Concelhos de Câmara de Lobos e Ribeira Brava (Rodrigues, 2005).

Os perigos naturais podem constituir potenciais fontes de risco para a população. No entanto, importa sublinhar que o risco só existe para a população quando existe consciência/perceção de risco. Portanto, para além de serem avaliados de forma objetiva por técnicos especializados, os riscos também são avaliados subjetivamente pela população. A avaliação subjetiva do risco ou perceção diz respeito à forma como os indivíduos que não são especialistas pensam sobre o risco e à avaliação que fazem do nível de ameaça de um certo acontecimento (Lima, 2005). A perceção de risco inclui três aspetos fundamentais: a) a fonte de risco, que pode ser um fenómeno natural, tecnológico ou uma atividade; b) a dimensão de incerteza, ou seja, a avaliação das probabilidades de ocorrência de um fenómeno; c) a gravidade dos impactos, isto é, a avaliação das possíveis perdas (Lima, 2005).

A discrepância existente entre especialistas e as pessoas expostas a um risco é algo muito presente nas múltiplas pesquisas realizadas neste âmbito. De acordo com Lima (2004), “os *experts* técnicos e o público encontram-se frequentemente em desacordo acerca de quais as melhores ações a tomar e acerca da gravidade dos riscos” (p. 150). Enquanto os especialistas da área concentram a sua atenção em aspetos técnicos, de carácter quantitativo e com tendência a serem analíticos e objetivos, os não especialistas (leigos) realizam juízos de valor e tomam as suas decisões tendo por base qualquer informação que tenham disponível, grande parte da mesma provinda da comunicação social, no que está mais próximo da sua realidade, no que imaginam ou recordam de situações passadas ou semelhantes, respondendo assim, a mais fatores de origem social e psicológica. De acordo com Maia (2010) o risco até poderá ser o mesmo, contudo, especialistas e leigos “falam” linguagens diferentes, apresentam também preocupações diferentes e ouvem coisas diferentes nas mesmas palavras” (p.12), o que conduz a muitas incompreensões e divergências entre ambos. Note-se que é fundamental incorporar a perceção de risco da população com o conhecimento técnico para que se possa implementar medidas de mitigação do risco adequadas e eficazes. Este aspeto tem sido negligenciado em Portugal, “reduzindo-se a participação pública a ações de carácter pontual e, geralmente, com reduzido impacto nas decisões técnicas e políticas” (Figueiredo, Valente, Coelho, & Pinho, 2004, p. 1).

10.3 Estudo empírico

10.3.1 Amostra

Selecionou-se os concelhos do Funchal e da Ribeira Brava, tendo em conta que ambos foram afetados por aluviões. Dentro dos concelhos selecionou-se freguesias mais afetadas e menos afetadas. Assim, no concelho da Ribeira Brava selecionou-se como mais afetadas as freguesias da Ribeira Brava e Serra de Água, e como menos afetada a freguesia do Campanário. No concelho do Funchal selecionou-se como mais afetadas as

freguesias do Monte e Santo António e como menos afetada a freguesia de São Martinho.

Com base nos dados dos Censos 2011 (http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=ine_censos_publicacao_det&contexto=pu&PUBLICACOESpub_boui=156661814&PUBLICACOESmodo=2&selTab=tab1&pcensos=61969554) delimitou-se o número de sujeitos da amostra. Para o cálculo do tamanho da amostra teórica recorreu-se à equação $n = \frac{N \cdot n\emptyset}{N + n\emptyset}$ onde n refere-se ao tamanho da amostra, N ao número de sujeitos da população e $n\emptyset$ à primeira estimativa da amostra. Para o cálculo de $n\emptyset$ utilizou-se a equação $n\emptyset = 1/(E\emptyset^2)$, em que $E\emptyset$ equivale ao erro amostral aceitável, neste caso de 0,05.

Quadro 17 - Caracterização breve das freguesias selecionadas para o estudo

Município		Freguesia		Amostra	Tipo de população
Nome	(N)	Nome	(N)	(N)	
Ribeira Brava	13 375	Serra de água	1049	388	Rural afetada recentemente por perigos naturais
		Ribeira Brava	6588		Rural não afetada recentemente por perigos naturais
		Campanário	4582		
Funchal	111 892	Santo António	27383	399	Urbana afetada recentemente por perigos naturais
		Monte	6701		
		São Martinho	26482		Urbana não afetada recentemente por perigos naturais
Total	125 267		72785	787	

Assim, no presente estudo participaram 792 indivíduos madeirenses com idades compreendidas entre os 18 e os 86 anos, que aderiram voluntariamente, distribuídos de forma equilibrada entre as diferentes faixas etárias, embora se verifique uma predominância na faixa etária dos 40 e 50 anos ($n = 191$, 24,1%). A maioria dos participantes pertence ao género feminino ($n = 533$, 67,3%) e 50,8% reside no Funchal e 49,2% na Ribeira Brava. No que concerne às habilitações escolares a grande maioria dos participantes tem a 4ª classe ($n = 285$, 36,0%), seguindo-se o 12º ano ($n = 139$, 17,6%). 4,5% dos participantes não sabe ler nem escrever e 12,6% dos participantes tem o ensino superior. Relativamente à situação profissional a grande maioria dos participantes encontra-se empregada ($n = 349$, 44,1%) e vive do rendimento do trabalho ($n = 470$, 59,3%). O agregado familiar de grande parte dos indivíduos é composto por 3 ($n = 219$, 27,7%), 4 ($n = 201$, 25,4%) e 2 ($n = 180$, 22,7%) elementos. 35,7% dos participantes vive com crianças, 22,7% vive com pessoas idosas e 5,4% vive com pessoas

acamadas e dependentes. A maioria dos indivíduos tem casa própria (n =693, 87,5%) e classificam o estado geral de conservação da residência como bom (n =387, 48,9%) e razoável (n =285, 36,0%).

10.3.2 Instrumentos

De forma a responder aos objetivos propostos foram aplicados dois questionários, a saber: Questionário de Perceção de Risco de Aluvião: RAM (construído para o efeito) e IARSP - Instrumento de Análise da Rede Social Pessoal (Alarcão & Sousa, 2007).

Uma vez que não se encontrou nenhum instrumento validado para avaliar a perceção de risco, procedeu-se à elaboração de um questionário, com base em questionários aplicados noutros estudos (Coelho, Valente, Pinho, Carvalho, Ferreira, & Figueiredo, 2004; Bourque, Kano, Mileti, & Wood, 2008; ONHW, 2006; Reser, Bradley, Glendon, Ellul, & Callaghan, 2012; Tavares, Tavares, Cunha, & Freiria, 2011; Tavares, Mendes, & Basto, 2011).

Foi elaborada uma primeira versão do questionário, que foi revista por profissionais da área e sujeita a alterações. Elaborou-se então uma segunda versão que foi aplicada no terreno. Neste sentido, fez-se um pré-teste, aplicando o questionário a alguns sujeitos, escolhidos aleatoriamente, dos concelhos que integram a amostra (Funchal e Ribeira Brava). Constatou-se que o questionário estava demasiado extenso e havia questões ambíguas e de difícil interpretação, pelo que se procedeu a uma nova revisão (versão final). O questionário ficou então composto por 38 itens divididos em quatro subdomínios: aspetos sociodemográficos, perceção de risco, fontes de informação/conhecimento e medidas de autoproteção.

Para avaliar a rede de suporte social do indivíduo perante situações de risco e emergência, foi utilizado o instrumento de análise da rede social pessoal - IARSP (Alarcão & Sousa, 2007). É composto por 8 itens que visam analisar as características estruturais, funcionais e contextuais das redes de suporte social pessoal.

10.3.3 Procedimentos de investigação

Os questionários foram aplicados individualmente, de forma anónima, sendo que o conjunto de questões era lido em voz alta ao sujeito de modo garantir a fidedignidade da sua resposta. Em todas as áreas geográficas estudadas, procurou-se alcançar quer os meios populacionais mais periféricos, quer os localizados nas zonas de maior densidade populacional, para que a amostra fosse o mais heterogênea possível.

Os dados foram analisados através do programa *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS, versão 20.0).

10.4 Resultados

10.4.1 Perceção de risco de perigos naturais

Tanto a nível regional como a nível local os indivíduos apresentaram um valor médio superior ao ponto central da escala de análise (2), considerando-se que a perceção de risco dos indivíduos da amostra é elevada (Quadro 18 e Quadro 19).

A perceção de risco à escala regional apresentou valores superiores comparativamente à escala local, revelando que os indivíduos evidenciam um nível de perceção mais elevado com os perigos naturais na ilha da Madeira comparativamente aos perigos naturais no local onde vivem.

Quadro 18 - Média e desvio-padrão – Perceção de risco de perigos naturais à escala regional e local

Preocupação com os perigos naturais	Escala regional		Escala local	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Tempestades/Trovoadas/Chuvas intensas	3.22	.756	3.11	.920
Aluviões/enxurradas	3.34	.717	3.08	.975
Inundações	3.17	.807	2.89	1.020
Galgamentos costeiros/marés vivas/ondas gigantes	2.87	.961	2.19	1.132

Quadro 19 - Média e desvio-padrão – Probabilidade da residência ser destruída por uma aluvião

Probabilidade da casa ser destruída por uma aluvião	Média	Desvio-padrão
	2.42	.907

Para a perceção sobre o risco de aluviões, os indivíduos da amostra apresentaram um valor médio superior ao ponto central da escala de análise (2), considerando-se que a perceção de risco é elevada (Quadro 20).

Quadro 20 - Média e desvio-padrão - Perceção de risco de aluvião

Perceção de risco de aluvião	Média	Desvio-padrão
Preocupação com os perigos naturais à escala regional.	3.34	.717
Preocupação com os perigos naturais à escala local.	3.08	.975
Gravidade dos impactos se a Madeira voltasse a ser atingida por uma aluvião.	3.44	.816
Probabilidade da casa ser destruída por uma aluvião.	2.42	.907

10.4.2 Análise inferencial

A perceção de risco é influenciada por variáveis individuais (idade, habilitações literárias, profissão) e variáveis contextuais (concelho de residência e experiência prévia de perigos). De seguida apresentam-se os resultados mais relevantes.

Influência da variável idade

- Relativamente ao grau de preocupação dos indivíduos com os perigos naturais na ilha da Madeira só se verificaram diferenças em função da idade para as Tempestades, trovoadas e chuvas intensas ($\chi^2 = 22,740$; $p = .000$). Já ao nível local, verificaram-se diferenças significativas em função da idade para todos os perigos considerados: tempestades, trovoadas, chuvas intensas ($\chi^2 = 29,069$; $p = .000$), aluviões/enxurradas ($\chi^2 = 14,332$, $p = .014$), inundações ($\chi^2 = 15,500$, $p = .008$) e galgamentos costeiros/marés vivas/ondas gigantes ($\chi^2 = 13, 253$, $p = .021$). Os indivíduos mais velhos, a partir dos 50 anos, evidenciaram uma preocupação mais elevada com os perigos naturais a nível local.
- A perceção de probabilidade da residência ser destruída por uma aluvião varia em função da idade, $\chi^2 = 32, 348$, $p = .000$., sendo que, em todos os casos em que se registaram diferenças, os indivíduos mais velhos evidenciaram maior perceção de probabilidade da casa ser destruída por uma aluvião.

Influência da variável habilitações literárias

- Constatou-se diferenças significativas entre a preocupação com os perigos naturais na ilha da Madeira em função do nível de habilitações literárias: tempestades, trovoadas e chuvas intensas ($\chi^2 = 19, 998$, $p = .001$), aluviões/enxurradas ($\chi^2 = 15, 628$, $p = .008$) e inundações ($\chi^2 = 13, 951$, $p = .016$). Também a nível local verificaram-se diferenças entre o nível de habilitações literárias e o grau de preocupação com os perigos naturais: tempestades, trovoadas e chuvas intensas ($\chi^2 = 37,035$, $p = .000$), aluviões/enxurradas ($\chi^2 = 26, 212$, $p = .000$) e inundações ($\chi^2 = 24, 468$, $p = .000$). Os indivíduos com habilitações

literárias mais baixas evidenciaram maior preocupação com todos os perigos naturais.

- Os indivíduos com habilitações literárias mais baixas evidenciaram uma perceção mais elevada de probabilidade da casa ser destruída por uma aluvião ($\chi^2 = 30,007, p = .000$).

Influência da variável profissão

- Não se verificaram diferenças ao nível do grau de preocupação com os perigos naturais na ilha da Madeira em função da profissão: tempestades, trovoadas e chuvas intensas ($\chi^2 = 20,398, p = 0,086$), aluviões/enxurradas ($\chi^2 = 13,157, p = 0,436$), inundações ($\chi^2 = 7,894, p = 0,850$) e galgamentos costeiros ($\chi^2 = 10,089, p = 0,687$). Já ao nível local verificaram-se diferenças significativas ao nível do grau de preocupação com os perigos naturais em função da profissão: tempestades, trovoadas e chuvas intensas ($\chi^2 = 44,007, p = .000$), aluviões/enxurradas ($\chi^2 = 26,292, p = 0,016$), inundações ($\chi^2 = 32,140, p = 0,002$) e galgamentos costeiros/marés vivas/ondas gigantes ($\chi^2 = 23,835, p = 0,033$). Para todos os perigos naturais os indivíduos com profissões menos qualificadas, os reformados e as domésticas evidenciaram um grau de preocupação mais elevado.
- Verificaram-se diferenças na perceção de probabilidade da própria residência ser destruída por uma aluvião em função da profissão ($\chi^2 = 35,915, p = .001$). Os indivíduos com profissões menos qualificadas evidenciaram uma perceção de probabilidade mais elevada. Contudo, os “operários, artifices e trabalhadores similares” e o “pessoal administrativo e similares” consideraram maior a probabilidade da casa ser destruída por uma aluvião comparativamente aos desempregados.

Influência da variável concelho

- Verificou-se diferenças entre os indivíduos dos concelhos do Funchal e Ribeira Brava e a preocupação com os seguintes perigos naturais que podem ocorrer na ilha da Madeira: tempestades, trovoadas e chuvas intensas ($U = 70398,500, p = 0,006$), aluviões/enxurradas ($U = 69064,500, p = 0,001$) e galgamentos costeiros/marés vivas/ondas gigantes ($U = 70886,500, p = 0,013$). Os indivíduos da Ribeira Brava evidenciaram uma maior preocupação com as tempestades, trovoadas e chuvas intensas e com as aluviões comparativamente aos indivíduos do Funchal. Contrariamente, os indivíduos do Funchal evidenciaram uma preocupação mais elevada com os galgamentos costeiros/marés vivas/ondas gigantes. A nível local também se verificaram diferenças entre os indivíduos dos concelhos do Funchal e Ribeira Brava e a preocupação com os



seguintes perigos naturais que podem ocorrer no local onde vivem: tempestades, trovoadas e chuvas intensas ($U = 65370,000$, $p = 000$), aluviões/enxurradas ($U = 62357,500$, $p = 000$) e inundações ($U = 67806,500$, $p = 001$). Os indivíduos da Ribeira Brava evidenciaram uma maior preocupação com todos os perigos referidos à escala local.

- Verificaram-se, igualmente, diferenças entre os indivíduos do concelho do Funchal e os indivíduos da Ribeira Brava relativamente à probabilidade da própria casa ($U = 68740,000$, $p = 001$) ser destruída por uma aluvião. Os indivíduos da Ribeira Brava consideraram que existe maior probabilidade comparativamente aos indivíduos do Funchal.

Influência da variável “já foi afetado por perigos naturais”

- Constataram-se diferenças significativas entre os indivíduos que já foram afetados por perigos naturais e os indivíduos que nunca foram afetados ao nível do grau de preocupação com os perigos naturais na ilha da Madeira: tempestades, trovoadas e chuvas intensas ($U = 36307,000$, $p = .000$), aluviões/enxurradas ($U = 33305,000$, $p = .000$) e inundações ($U = 35008,000$, $p = .000$). A nível local também se verificaram diferenças entre os indivíduos que já foram afetados por perigos naturais e os indivíduos que nunca foram afetados: tempestades, trovoadas e chuvas intensas ($U = 32930,000$, $p = .000$), aluviões/enxurradas ($U = 31077,500$, $p = .000$) e inundações ($U = 34716,500$, $p = .000$). Os indivíduos que já foram afetados por perigos naturais relataram maior preocupação com os perigos naturais no local onde vivem comparativamente aos indivíduos que nunca foram afetados.
- Verificaram-se também diferenças significativas entre os indivíduos que já foram afetados por perigos naturais e os indivíduos que nunca foram e a perceção de probabilidade da residência ($U = 36422,000$, $p = 000$) ser destruída por uma aluvião. Os indivíduos que já foram afetados por perigos naturais evidenciaram uma perceção de probabilidade de destruição mais elevada do que os indivíduos que nunca foram afetados.

Fontes de informação/conhecimento

- Relativamente aos perigos naturais a que estão expostos no local onde vivem, 46.1% dos sujeitos da amostra considerou-se informado, 33.2% pouco informado e 3.2% muito informado. Quanto às medidas para se protegerem dos perigos naturais, 44.3% dos indivíduos considerou-se informado, 33.8% pouco informado e 2.8% muito informado.



- No que concerne à percepção dos sujeitos quanto aos perigos de aluvião a que possam estar expostos no local onde vivem, a maioria dos sujeitos considerou-se “Informado” (39.5%, n=313) e “Pouco Informado” (35.1%, n=278). Já 18.8% dos participantes (n=149) considerou-se “Nada informado” e 3.2 % (n=27) considerou-se “Muito Informado”. Relativamente ao grau de conhecimento sobre a quem pedir ajuda na ocorrência de uma aluvião, grande parte dos sujeitos da amostra considerou-se “Informado” (60.4%, n=478), seguindo-se “Pouco Informado” (21.1%, n=167), “Muito Informado” (8.6%, n=68) e por fim, “Nada Informado” (8.2%, n=65).
- Quando inquiridos relativamente sobre a significância dos avisos meteorológicos (amarelo, laranja e vermelho) 68.4% dos sujeitos referiu sentir-se informado, 22.1% muito informado e 2.4% nada informado.

Medidas de autoproteção

- Constatou-se que uma grande percentagem dos inquiridos deposita maior confiança nos bombeiros (Confio 61.1%, n=484; Confio Muito 30.9%, n=245). Seguidamente, surgem algumas pessoas dos círculos sociais mais próximos nomeadamente a família (Confio 56.3%, n=446, Confio Muito 31.6%, n=250), os vizinhos (Confio 61.6%, n=488; Confio Muito 12.5%, n=99) e os amigos (Confio 62.6%, n=496; Confio Muito 10.7%, n=85). A EMIR (Confio 59.7%, n=473; Confio Muito 26.1%, n=207) e a Proteção Civil (Confio 59.7%, n=473; Confio Muito 22.9%, n=181) são entidades em quem os indivíduos também confiam, assim como a polícia (Confio 59.8%, n=474; Confio Muito 22%, n=174) e o exército (Confio 58.3%, n=462; Confio Muito 20.3%, n=161). Por outro lado, as pessoas ou instituições que apresentaram por parte dos inquiridos um menor grau de confiança foram o governo regional (Confio Pouco 25.1%, n=199; Não Confio 35.2%, n=279), o pároco (Confio Pouco 19.9%, n=158; Não Confio 29.8%, n=236) e a câmara municipal e junta de freguesia (Confio Pouco 24.7%, n=191; Não Confio 24.1%, n=196). Parece-nos importante salientar dois aspetos: a confiança que os indivíduos demonstram nas entidades que prestam auxílio em situações de risco e emergência, nomeadamente os bombeiros, e também nos familiares, amigos e vizinhos, e a falta de confiança em entidades de cariz político/administrativo (governo regional, câmara municipal e junta de freguesia).

Medidas de prevenção e resposta a situações de emergência

- A maioria dos sujeitos 90.8% (n=719) afirmou ter uma lista com “números de telefone de familiares e amigos” (82,1%, n = 650) e “estojo de primeiros socorros” (81,9%, n= 649). Contrariamente, existem determinadas medidas de prevenção que a maioria dos sujeitos não possui: “alarme de incêndio” (92,8%,

n=735), “combinar um ponto de encontro para a família se juntar” (88,8%, n=703) e “reserva de alimentos e água” (51,4%, n=407).

Rede de suporte social

- Verificou-se uma correlação negativa entre o tamanho da rede de suporte social e a preocupação com as aluviões/enxurradas ($r = -.077$, $p = .030$) e inundações ($r = -.092$, $p = .009$) à escala regional. Quanto maior a rede de suporte social dos indivíduos, menor a preocupação com os perigos naturais.
- Já a nível local, não se verificou nenhuma correlação entre o tamanho da rede e a preocupação com os perigos naturais: tempestades, trovoadas e chuvas intensas ($r = -.068$, $p = .057$), aluviões/enxurradas ($r = -.055$, $p = .121$), inundações ($r = -.032$, $p = .366$) e galgamentos costeiros/marés vivas/ondas gigantes ($r = -.044$, $p = .219$).
- Não existe correlação entre o tamanho da rede de suporte social e a probabilidade da casa ser destruída por uma aluvião ($r = -.020$, $p = .583$).

10.5 6 Síntese e sugestões futuras

Da análise global dos resultados apresentados anteriormente, pode considerar-se que os indivíduos da amostra se manifestaram preocupados com os perigos naturais e também com a probabilidade de serem por eles afetados, o que pode ser interpretado como estando conscientes dos riscos naturais a que estão expostos.

A perceção de risco é influenciada por diversos fatores, nomeadamente:

- a) a idade, no sentido em que os indivíduos mais velhos a partir dos 40-50 anos evidenciaram uma perceção de risco mais elevada. Parece-nos que o facto dos indivíduos mais velhos mostrarem maior preocupação com os perigos naturais e perceberem maior probabilidade da residência ser destruída por uma aluvião comparativamente aos indivíduos mais novos poderá estar relacionado com o facto de se sentirem mais vulneráveis.
- b) as habilitações literárias, os indivíduos com habilitações literárias mais baixas revelaram uma perceção de risco mais elevada. A literatura da área explica estes resultados com base no facto dos indivíduos com habilitações superiores possuírem mais informação e estarem mais conscientes de medidas de mitigação do risco e podem sentir de certa forma que controlam os perigos (Ho, Schaw, Lin, & Chiu, 2008).
- c) a profissão, os indivíduos com um nível de qualificação mais baixo demonstraram ter uma perceção de risco mais elevada. Tal como o que acontece com as habilitações literárias, estes resultados podem ser explicados com base no facto dos indivíduos que desempenham profissões com um nível de qualificação superior

sentirem que possuem informação suficiente e que podem controlar os perigos (Ho, Schaw, Lin, & Chiu, 2008).

- d) o concelho de residência, os indivíduos da Ribeira Brava mostraram ter uma perceção mais elevada de risco comparativamente aos indivíduos do Funchal. De acordo com estudos nas áreas urbanas a perceção de risco tende a ser mais elevada do que nas áreas rurais (Janes, Faas, Murphy, Tabir, Whiteford, & McCarthy, 2013), no entanto, no presente estudo verificou-se o oposto. Provavelmente, devido ao facto da Ribeira Brava ser uma cidade rural, os indivíduos poderão sentir um certo isolamento e percecionar um maior grau de vulnerabilidade, o que aumenta a sua perceção de risco.
- e) ter sido afetado anteriormente por perigos naturais, no sentido em que quem já foi afetado diretamente por perigos naturais apresentou uma perceção de risco mais elevada comparativamente a quem nunca foi afetado.

A maioria dos indivíduos considerou-se informado e muito informado sobre os perigos naturais a que estão expostos no local onde vivem, as medidas para se proteger dos perigos naturais, os perigos de aluvião a que estão expostos no local onde vivem, a quem pedir ajuda na ocorrência de uma aluvião e o significado dos avisos meteorológicos, evidenciando deste modo uma perceção elevada do grau de informação.

Saliente-se o elevado nível de confiança que os indivíduos demonstraram nas entidades que prestam auxílio em situações de risco e emergência, sobretudo os bombeiros, e o baixo nível de confiança nas entidades de cariz político/administrativo (governo regional, *câmara municipal* e junta de freguesia). A perceção da existência de mecanismos técnicos e institucionais adequados para enfrentar os riscos pode determinar a capacidade de convivência com um determinado perigo. Neste sentido, a capacidade de conviver com determinados fatores de perigo será tanto maior, quanto maior for a confiança nos instrumentos políticos e técnicos de controlo e gestão (Valente, Figueiredo, & Coelho, 2008).

Relativamente às medidas de prevenção e resposta a situações de emergência verificou-se que a maioria dos indivíduos não tinha alarme de incêndio, um ponto de encontro para a família se juntar em caso de ocorrência de desastre e reserva de alimentos e de água. Listas com números de telefone de familiares e amigos e estojo de primeiros socorros são medidas que a maioria dos indivíduos afirmou ter. Constatou-se que os desempregados, os estudantes e os trabalhadores com profissões menos qualificadas adotavam em maior número algumas destas medidas do que os trabalhadores com profissões mais qualificadas. Note-se que apenas 27,7% dos indivíduos da amostra tinha seguro habitacional. Este facto parece-nos importante pois numa situação de desastre/catástrofe os indivíduos que *têm* a casa assegurada encontram-se menos vulneráveis no sentido em que *têm* forma financeira de arranjar os possíveis estragos.

Parece-nos importante salientar que se verificou uma relação entre a perceção de risco de perigos naturais e a rede de suporte social do indivíduo, no sentido em que quanto maior a rede de suporte social dos indivíduos, menor a preocupação com aluviões/enxurradas e inundações. Provavelmente os indivíduos com redes maiores sentem-se mais seguros e, conseqüentemente menos vulneráveis, sentindo que têm pessoas que os podem ajudar perante situações de risco e emergência e reduzindo a sua perceção de perigos naturais. Note-se que, o tamanho da rede tem uma influência significativa na quantidade de apoio recebido, ou seja, uma rede maior implica maior suporte social (Yandong, 2013). No entanto, estando associada a uma perceção de risco menor, uma rede de suporte social pode contribuir para uma maior vulnerabilidade dos indivíduos aos perigos naturais. Estamos perante uma relação complexa: por um lado as redes de suporte social maiores contribuem com um maior suporte social para o indivíduo, mas, por outro lado, contribuem para uma perceção de risco menor.

Tendo em conta os resultados do presente estudo parece-nos importante apostar na formação de uma equipa constituída por técnicos de diferentes áreas (proteção civil, psicologia, enfermagem) que circule pelas freguesias que se encontram mais expostas aos riscos promovendo e dinamizando grupos de discussão (que se podem realizar mensalmente) que envolvam a participação da comunidade. O objetivo seria criar espaços de encontro entre a população, fomentando um sentido de comunidade e capacitando os indivíduos para uma maior consciência dos perigos e de tomadas efetivas de autoproteção. Esta equipa também poderia circular pelas escolas, na abertura do ano letivo por exemplo, para informar e sensibilizar pais e alunos para a problemática dos riscos naturais.

Paralelamente seria fundamental apostar em campanhas de informação/sensibilização sobre os riscos naturais e ações de mitigação do risco direcionadas à população madeirense em geral, mas que abranjam sobretudo os indivíduos mais novos, com habilitações literárias superiores e que desempenham profissões com um nível de qualificação elevado, uma vez que, de acordo com o presente estudo, estes indivíduos apresentam uma perceção de risco mais baixa. Paralelamente, e uma vez que se encontrou uma população com muitos idosos, sobretudo população rural, seria pertinente direcionar campanhas de informação/sensibilização para a população mais envelhecida, realizando e dinamizando atividades através dos centros de dia e casas do povo.

As campanhas de informação/sensibilização devem ter como objetivo não apenas informar e sensibilizar a população para a problemática dos riscos naturais mas também promover a participação ativa dos cidadãos criando um sentido de responsabilidade e pertença à comunidade, proporcionando um espaço em que possam sentir-se ouvidos,

em que possam expor as suas opiniões e preocupações e em que possam sentir que aquilo que pensam é *válido* e tido em conta pelos especialistas da área e pelas entidades político/administrativas. Neste sentido, é fundamental adequar a linguagem dos especialistas à população colocando os termos técnicos, como por exemplo aluvião, numa linguagem coloquial, como por exemplo enxurrada.

Concomitantemente, a informação porta a porta parece-nos um método eficaz. Aquando da realização dos inquéritos, verificou-se que grande parte dos indivíduos foi recetivo à informação. Nesta ótica a distribuição de panfletos com medidas de autoproteção e com os principais contactos de entidades que prestam auxílio em situações de risco e emergência seria uma medida a implementar. Concomitantemente, e dado o grau de confiança que os indivíduos depositam nos meios de comunicação, nomeadamente na televisão, este seria um meio eficaz de sensibilizar e informar os indivíduos sobre o que fazer na prevenção e na ocorrência de desastres naturais.

Como se verificou uma consciencialização por parte dos indivíduos da responsabilidade que cada cidadão *deverá* ter na adoção de medidas que reduzam o impacto dos perigos naturais, consideramos que é importante aproveitar esta consciencialização para informar e incutir nos cidadãos a tomada de medidas de autoproteção com o propósito de minimizar os riscos naturais.

Uma vez que os indivíduos demonstraram um nível elevado de confiança em entidades que prestam auxílio em situações de risco e emergência é importante que futuras campanhas de sensibilização/intervenção sejam efetivadas em parceria com estas entidades de modo a que a população seja o mais recetiva possível.

Considerando que o capital social afigura-se crucial em situações de risco e emergência, e tendo em conta que a rede de suporte social da maioria dos indivíduos do presente estudo é pequena e constituída sobretudo por membros familiares, consideramos importante criar redes de suporte social, nas quais se incluam técnicos e instituições públicas e privadas, que estejam preparados para prestar apoio em situações de risco e emergência aos indivíduos, capacitando deste modo a comunidade para prever e enfrentar os riscos naturais.

11 Síntese e recomendações

Este relatório sintetiza os resultados da Fase 2 do projeto EARAM (Estudo de Avaliação do risco de Aluviões na Ilha da Madeira) que produziu 16 produtos, identificados no Anexo 2. Neste conjunto de resultados incluem-se a caracterização dos fenómenos de aluviões na ilha da Madeira (Capítulo 3), a proposta de uma estratégia para gerir o risco associado (Capítulo 7) e um conjunto de metodologias e ferramentas que possibilitam a avaliação do risco e contribuem para a previsão da sua ocorrência num determinado local e instante (Capítulo 4, 5, 6 e 8).

Os trabalhos desenvolvidos não esgotam as possibilidades de investigação para melhoria do conhecimento sobre este fenómeno, nem concluem as atividades necessárias para condicionar o risco a níveis adequados.

Entre os trabalhos futuros com maior potencial para a redução do risco inclui-se o sistema de previsão e alerta de aluviões. Nesse sentido é apresentado nas Notas Técnicas A3 e A4 um plano de ação para o seu desenvolvimento e operacionalização (Capítulo 9).

A concretização do potencial do sistema de previsão e alerta exige um esforço continuado em várias áreas, envolvendo várias instituições regionais e nacionais. É também necessário manter as atividades de sensibilização da população (Capítulo 10) e assegurar eficácia na resposta a situações de emergência, por parte dos agentes de proteção civil.

Em paralelo com o desenvolvimento deste sistema, há um conjunto de outras ações que permitem aperfeiçoar os processos críticos de avaliação do risco, de ordenamento do território e de dimensionamento de obras de proteção. Algumas destas ações foram já incluídas em propostas de investigação que aguardam decisão de financiamento.

O estudo dos processos hidrológicos e de transporte de material sólido subjacentes ao fenómeno das aluviões na ilha da Madeira está condicionado pela existência de dados em quantidade suficiente. A manutenção de redes de monitorização já instaladas e a sua expansão é, por isso, crítica para permitir avanços substanciais de conhecimento no futuro próximo.

Em concreto é necessário assegurar o regular funcionamento das redes de medição da precipitação para obter registos de precipitação com a representatividade espacial, resolução temporal e dimensão adequada. É igualmente importante manter e expandir a rede hidrométrica experimental para obter registos de caudal e de transporte de material sólido que permitam calibrar os modelos hidrológicos e hidráulicos. O levantamento e caracterização das manchas de deslizamento deve também prosseguir para permitir melhorar os critérios de identificação das condições propícias aos deslizamentos de terrenos. Só a continuidade destas ações de monitorização, em

paralelo com a investigação orientada para a resolução práticas dos desafios identificados neste estudo, permitirá, a prazo, melhorar substancialmente as ferramentas de avaliação de risco e de previsão da ocorrência de aluviões.

As recomendações aqui sintetizadas e descritas em maior pormenor neste relatório e nas várias Notas Técnicas constituem um programa integrado de redução e controlo do risco de aluviões. A diversidade de áreas de intervenção previstas, o número de instituições envolvidas e o tempo necessário para que sejam obtidos resultados concretos recomendam que seja atribuída a uma instituição do Governo Regional o papel de coordenação de todo o programa. Esta instituição deverá estabelecer parcerias com as restantes entidades e deverá possuir os recursos técnicos e financeiros necessários para assegurar o cumprimento do programa.

12 Referências

Abreu, U., Tavares, A. O. e Rodrigues D. (2008). Processos de Perigosidade natural no Município de Câmara de Lobos – Madeira. Contributo para a Gestão do Risco e da Emergência. Território, Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, Nº15 pp. 53 – 71.

Alarcão, M., & Sousa, L. (2007). Rede social pessoal: do conceito à avaliação. *Psycologica*, 44, 353-376.

Andrade, E. C. (1982). 80 anos de Actividade de Correção Torrencial – Hidráulica Florestal (1901 – 1980), Ministério da Agricultura, Comércio e Pescas, Direcção – Geral das Florestas, 106 p.

Bourque, L., Kano, M., Mileti, D., & Wood, M. (2008). *National Survey of Disaster Experiences and Preparedness (NSDEP)*. Los Angeles: University of California.

Caine, N. (1980). The Rainfall Intensity – Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geog. Ann. A62*, pp 23 – 27

Casale, R. e Margottini (1999). *Floods and Landslides. Integrated Risk Assessment*. Springer, 373 p.

Castro, J, - Caracterização Hidráulica, Hidrológica e de Transporte Sólido do Evento de 20 de Fevereiro de 2010 na Ribeira de João Gomes – Ilha da Madeira, Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, 2011.

CENOR 2011

CENOR, Norvia (2015) Estabelecimento de Metodologias, de Parâmetros de Base e de Ferramentas Informáticas para a Realização de Estudos de Cheias na Ilha da Madeira. Relatório Final do Projecto de Investigação.

Chen, J-C. and Chuang, M.-R. (2014) Discharge of landslide-induced debris flows: case studies of Typhoon Morakot in southern Taiwan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1719–1730.

Coelho, C., Valente, S., Pinho, L., Carvalho, T., Ferreira, A., & Figueiredo, E. (2004). *A percepção social das alterações climáticas e do risco de cheia*. In Actas do 7º Congresso da água, Lisboa, APRH. Retirado de: <http://www.aprh.pt/congressoagua2004/PDF/64.PDF>

Conde, D., Baptista, M. A., Telhado, M.J. & Ferreira, R.M.L. (2015) Severity and exposure associated to tsunami actions in urban waterfronts. The case of Lisbon, Portugal. *Natural Hazards*, 79(3): 2125-2144. Doi: 10.1007/s11069-015-1951-z.

Ferreira, R, M,, Franca, M, J,, Leal, J, G, & Cardoso, A, H, - Mathematical modelling of shallow flows: Closure models drawn from grain-scale mechanics of sediment transport and flow hydrodynamics, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36, 1604–1621, 2009.

Figueiredo, E., Valente, S., Coelho, C., & Pinho, L., (2004). Conviver com o risco – A importância da incorporação da percepção social nos mecanismos de gestão do risco de cheia no concelho de Águeda. *In VIII Congresso Luso-Afro-Brasileiro de Ciências Sociais: A questão social no novo milénio, Coimbra.*

Fragoso, M., Trigo, R.M., Pinto, J.G., Lopes, S., Lopes, A., Ulbrich, S., & Magro, C. (2012). The 20 February 2010 Madeira flash-floods: synoptic analysis and extreme rainfall assessment. *Natural Hazards Earth System Sciences, 12*, 715–730.

Instituto Superior Técnico (IST), Universidade da Madeira (UM) & Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) - Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira - Relatório Síntese, 2010.

Instituto Superior Técnico (IST, ADIST) e Universidade da Madeira (UM) - Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira - Fase 2, (2015)

Karvonen, R.; Hepojoki, H.; Huhta, H. and Louhio, A. (2000) The use of physical models in dam-break flood analysis: development of rescue actions based on dam-break flood analysis (RESCDAM) (final report). Helsinki University of Technology and Finnish Environment Institute

Lima, M. L. (2004). Percepção de riscos ambientais: realismo ou ilusão? *In M.L. Lima, M.V. Cabral, & J. Vala (Eds.), Atitudes Sociais dos Portugueses 4 - Ambiente e Desenvolvimento* (pp. 157-192). Lisboa: Instituto de Ciências Sociais.

Lima, M. L. (2005). Percepção de riscos ambientais. In L. Soczka, (Ed.), *Contextos humanos e Psicologia Ambiental* (203-245). Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

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.

Maia, R. M. F. (2010). *Percepção de risco: diferenças e semelhanças entre um cortador de relva e um pombo* (Dissertação de Mestrado não publicada). Universidade de Lisboa, Lisboa.

Mayer, R. (1941). Noções de Hidráulica Fluvial. Direcção Geral dos Serviços Florestais e Agrícolas, 132p.

Municipia (2016)

Oregon Natural Hazards Workgroup (2006). *Household Natural Hazards Preparedness Survey*. Oregon: University of Oregon.

Pereira, Eduardo C. N. (1939) – Ilhas de Zarco. Câmara Municipal do Funchal. Madeira.

Quintal, Raimundo (1999a) – “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.

Reser, J., Bradley, G., Glendon, A., Ellul, M., & Callaghan, R. (2012). *Public Risk Perceptions, Understandings and Responses to Climate Change in Australia and Great Britain Final Report*. Australia: National Climate Change Adaptation Research Facility.

Rodrigues D. & Francisco Ayala-Carcedo (2000) Georisks a natural hazard database of historic events in Madeira Island. 25th General Assembly .E.G.S. Nice, p. 286.

Rodrigues D. (2005) – Análise de risco de movimentos de vertente e ordenamento do território na Madeira. Aplicação ao caso de Machico. Tese de Doutoramento em Geologia, Universidade da Madeira.

Rodrigues D., Ayala- Carcedo F.J. (2003) . Rain induced landslides and debris flows in Madeira Island Portugal. *Landslide .News*. The Japan Landslide Society, 14-15, 43-45

Rodrigues, D. (2005). Análise de risco de movimentos de vertente e ordenamento do território na Madeira: aplicação ao caso de Machico (Dissertação de doutoramento). Universidade da Madeira, Funchal.

Sepúlveda, S. M. F. (2011). Avaliação da precipitação extrema da ilha da Madeira (Dissertação de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Silva, J.B., Almeida, F.E. e Gomes, C.S.F. (2010). Aprender com a Natureza. Enxurradas e Inundações na Madeira. Suplemento Mais do Diário de Notícias da Madeira de 28 de Março de 2010.

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

Stark, C.P., Rossi, M., Peruccacci, S. e Guzzehi, F. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98, pp 239 – 267.

Stark, C.P., Rossi, M., Peruccacci, S. e Guzzehi, F. (2008). The Rainfaal intensity – duration controlo f shallow landslides and debris flows: na update. *Landslides*, 5, pp 3 – 17.

Takahashi T. (2007): *Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Taylor & Francis, Leiden, 448p.

Takahashi, T. (1991). *Debris flow*. IAHR Monograph Series. A.A.Balkema/Rotterdam/Brookfield.

Takahashi, T. 2007. Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures, Taylor and Francis Group, London, UK. ISBN-10: 0415435528.

Tavares, J., Tavares, A., Cunha, L., & Freiria, S. (2011). A vulnerabilidade social aos perigos naturais e tecnológicos em Portugal. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, 93, 95-127.

Tavares, A., Mendes, J., & Basto, E. (2011). Perceção dos riscos naturais e tecnológicos, confiança institucional e preparação para situações de emergência: O caso de Portugal continental. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, 93, 167-193.

Teixeira, H. - Caracterização Hidráulica, Hidrológica e de Transporte Sólido do Evento de 20 de fevereiro de 2010 na Ribeira de São João – Ilha da Madeira, Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, 2010.

Valente B. (2010). Temporal na Ilha da Madeira. Causas, Consequências e Formas Mitigadoras dos Danos. *Ingenium. Ordem dos Engenheiros*, II Série, Número 116, Março/ Abril, pp 44 – 47.

Zêzere, J.L. (2000). A classificação dos movimentos de vertente: tipologia, actividade e morfologia. *Apontamentos de Geografia, série investigação*, nº6, C.E.G., Lisboa, 29p.



13 Anexo 1 – Lista de aluviões ocorridos até 2013

Desastres naturais no século XVII

Evento	Localização	Consequências
Aluvião de 1611	Funchal	Grande enchente Grandes estragos e destruição, em grande parte, da igreja paroquial de Santa Maria Maior

Desastres naturais século XVIII

Evento	Localização	Consequências
Aluvião de 1707	Em toda a ilha da Madeira	Causou consideráveis prejuízos em toda a ilha
Aluvião de 18 de Novembro de 1724	Em toda a ilha da Madeira, principalmente em Machico	26 Vítimas mortais em Machico Destruição de 80 habitações
Aluvião 18 de Novembro de 1765	Funchal	As fortes chuvas causaram cheias nas ribeiras do Funchal, destruindo várias pontes na cidade. Uma vítima, que desapareceu no mar.

Desastres naturais no século XIX

Evento	Localização	Consequências
Aluvião de 9 de Outubro de 1803	Funchal, Machico, Santa Cruz, Campanário, Ribeira Brava e Calheta.	No Funchal, houve cerca de 600 a 1000 vítimas mortais. Vítimas mortais fora do Funchal. As ribeiras no Funchal galgaram, fazendo desaparecer ruas inteiras com seus habitantes e outras inundadas de água e lama deixaram os proprietários e inquilinos reduzidos à penúria. Casas e prédios foram arrastados para o mar. Fora do Funchal, as povoações que mais foram atingidas foram Machico, Santa Cruz, Campanário, Ribeira Brava e Calheta, tendo sido pequenos os prejuízos nos concelhos a Norte da ilha.
Aluvião de 26 de Outubro de 1815	Ilha da Madeira	Os estragos causados foram menores comparativamente à aluvião de 1804, mas ainda assim, causaram enormes perdas aos habitantes do Funchal. Por toda a ilha, houve prejuízos consideráveis e morreram várias pessoas, arrastadas pela violência das correntes.
Aluvião de 24 de Outubro de 1842	Funchal	As águas das ribeiras galgaram dos seus leitos, causando grandes estragos. A água chegou a invadir os segundos e terceiros andares das casas, sendo que, muitas famílias (que imploravam ajuda dos últimos andares e telhados) foram salvas por barcos. Calçadas foram convertidas em ribeiras. Famílias remediadas ficaram pobres. Grande parte da cidade ficou destruída e casas arruinadas até aos alicerces. Contabilizado um prejuízo de centenas de contos de reis.

Tempestade de 26 de Outubro de 1842	Funchal	Dois dias depois da aluvião, de 24 de Outubro, o vento sul, desencadeou no porto do Funchal uma tempestade. Ondas embravecidas, desencadeadas por ventos de Sul, saltavam as muralhas da Pontinha. A ondulação destruiu dez ou onze embarcações nos rochedos da praia do Funchal, tendo que ser salvos tripulantes e guardas que estavam a bordo.
Aluvião a inícios de Novembro de 1842	Machico	Duas mortes
Inundações de 17, 18, 19 e 20 de Novembro de 1848	Principalmente no concelho de Santana	Grandes inundações Foram arrastadas pelas águas muitas benfeitorias produtivas e importantes. No Funchal as águas das ribeiras correram com violência, mas não produziram estragos sensíveis.
Aluvião de 22 de Fevereiro de 1853	Machico	Ausência de informação
Aluvião de 5 e 6 de Janeiro de 1856	Funchal, Ribeira Brava, Tabua, Serra de Água, Ponta do Sol e no Paul do Mar e noutras localidades	Chuvas abundantes As correntes das ribeiras transportavam muito entulho que as entupiram, causando grandes devastações.
Aluvião de 14 e 15 de Março de 1856	Ilha da Madeira	Ribeira de João Gomes, no Funchal, ficou obstruída, inundando a cidade, mas não causou vítimas, porque as pessoas fugiram. Na Ribeira Brava, a ribeira destruiu quase toda a sua muralha, destruiu o cemitério (levando para o mar cadáveres já enterrados). Na Calheta, um deslizamento destruiu 14 casas, não causou vítimas porque haviam fugido. A Serra de Água também voltou a ter novos estragos.
Inundações de 1 de janeiro de 1876	Madalena do Mar	Causaram prejuízos importantes.
Aluvião de 2 e 3 de Outubro de 1895	S. Vicente, Faial, Ponta Delgada, Boa Ventura e Seixal	Produziu grandes estragos Uma vítima mortal (do Seixal) As ribeiras do Funchal transportaram uma grande quantidade de água.

Desastres naturais no século XX

Evento	Localização	Consequências
Aluvião de 8 e 9 de Novembro de 1901	Funchal	Chuvas abundantes Inundação e destruição de ruas e caminhos Provocou alguns desmoronamentos, principalmente na levada de Santa Luzia.
Aluvião de 29 de Novembro de 1901	Funchal e Machico	Inundações e desmoronamentos A ribeira arrasou as pontes dos sítios da Ribeira Grande, Cales e Moinho da Serra, encaminhando-se para a Banda de Além. Um deslizamento aterrou uma casa no sítio da Ribeira de Machico. 9 Pessoas morreram em Machico

Aluvião de 25 e 26 de Fevereiro de 1920	Toda a ilha	<p>Violento temporal de vento e chuva que causou inúmeros prejuízos em toda a ilha.</p> <p>As ribeiras que atravessam a cidade do Funchal não transbordaram, apesar de transportarem muita água.</p> <p>Houve inundações em vários sítios devido à abundância das chuvas e dos ribeiros da Nora, do Til e dos Louros terem ficado obstruídos.</p> <p>No bairro de Santa Maria chegaram a andar barcos nas ruas para transportar as pessoas.</p> <p>Em toda a ilha ficaram mais de 500 pessoas desalojadas.</p> <p>Incalculáveis os prejuízos causados pelo vento (de NW) no arvoredado, nos canaviais e em muitas das outras culturas.</p> <p>4 Vítimas mortais, uma delas era uma criança.</p> <p>Desapareceram alguns barcos de pesca de Camara de Lobos e seus tripulantes.</p> <p>O barco Arriaga, do Porto Santo, com 16 passageiros, foi arrastado para o sul, mas foi encontrado por um barco inglês, que resgatou os passageiros.</p>
Aluvião a 5 e 6 de Março de 1921		<p>Abundantes chuvas, acompanhadas de trovoada em toda a ilha.</p> <p>Inundações e estragos em Machico, Ribeira Brava, etc.</p> <p>Em Machico as águas subiram, em alguns pontos, quase ao primeiro andar das casas.</p> <p>Morreram 4 crianças na Ribeira Brava, três devido a um desmoronamento do prédio e uma arrastada pelas águas.</p>
Aluvião de 15 de Dezembro de 1926	Funchal	<p>Violento temporal</p> <p>Ventos de SW provocaram grande agitação marítima e chuva forte</p> <p>O caudal das ribeiras aumentou consideravelmente, transportando até ao mar animais mortos e troncos de árvores.</p> <p>Morreram 6 pessoas no naufrágio de um iate</p>
Aluvião 6 de Março de 1929	Rosário em S. Vicente	<p>Derrocadas (fluxos de detritos)</p> <p>32 Vítimas mortais e vários feridos graves.</p> <p>11 Casas destruídas.</p> <p>Perda de 100 palheiros e de 100 cabeças de gado.</p> <p>Prejuízos materiais avaliados em 1000 contos.</p>
Aluvião a 2 e 3 de Outubro de 1931	Funchal e S.Vicente	<p>Violenta trovoada e chuva torrencial.</p> <p>O caudal das ribeiras subiu bastante mas não invadiu as ruas marginais, mas a chuva provocou inundações, até 1,5m de altura.</p> <p>No Funchal, algumas ruas transformaram-se em ribeiros. Os bombeiros chegaram a usar uma canoa para transportar os residentes.</p>
Aluvião a 30 de Janeiro de 1933	Madalena do Mar	<p>Foi consequência do desabamento de Agosto de 1932.</p> <p>O entulho do desabamento que havia formado uma barragem às águas da ribeira, foi arrastado pela corrente devido a chuvas fortes.</p> <p>Uma vítima mortal e alguns feridos</p> <p>12 Casas foram destruídas ou tiveram que ser abandonados.</p> <p>Prejuízos materiais de cerca de 2 000 contos (1 800 contos noutra fonte).</p>

Aluvião de 30 de Dezembro de 1939	Madalena do Mar e um pouco por toda a ilha	Segundo aluvião, devido à barragem natural (escorregamento-barragem) O forte declive do leito a jusante da barragem, contribuiu para acelerar o turbilhão de água, lama e rochas até ao mar. Arrasando, terrenos agrícolas, casas, animais, árvores e pessoas. Arrasou terrenos de cultura. As ribeiras no Funchal trouxeram grande caudal de água. 5 Vítimas mortais 40 Casas destruídas Prejuízos materiais de cerca de 7 000 contos
Aluvião a 14 e 15 de Outubro de 1945	Funchal e Madalena do Mar	No Funchal, várias ruas foram inundadas. Na Madalena do Mar, as inundações e o vento forte, destruíram consideráveis terrenos de cultivo. Ainda na Madalena, 25 famílias com cerca de 130 pessoas perderam as suas modestas habitações.
Inundação de 3 de Novembro de 1956	Machico, Santa Cruz, Porto da Cruz, Água de Pena e Santo da Serra	Prejuízos avultados, sobretudo, em prédios urbanos e rústicos, casas destruídas, pontes, estradas, campos de cultura e animais arrastados para o mar. 6 Vítimas mortais e várias pessoas feridas. Prejuízos materiais avaliados em 11 000 (sobretudo na agricultura)
Aluvião a 9 de Janeiro de 1970	Ribeira Brava	A ribeira destruiu em sete pontos da estrada, entre a vila da Ribeira Brava e a freguesia da Serra de Água. O caudal da ribeira chegou ao nível do sítio da Ponte Vermelha e ao nível do piso da estrada marginal. Duas pessoas desaparecidas, que haviam sido arrastadas para o mar. 4 Vítimas mortais e 4 feridos Prejuízos materiais avaliados em centenas de contos.
Aluvião a 8 de Março de 1970	Porto Santo	Forte trovoada Chuva torrencial Estragos em muralhas, estradas (partes da estrada do aeroporto o asfalto foi arrancado). Danos em culturas. Uma criança faleceu.
Aluvião a 21 de Setembro de 1972	Funchal	As águas arrastaram grandes blocos rochosos e destruíram parte de um bairro de lata (por baixo do campo de Futebol do Marítimo). Morreram 3 pessoas no bairro de lata.
Aluvião a 20 de Dezembro de 1977		Chuva forte sobre o Funchal. Muitos deslizamentos nas partes altas do Funchal. 4 Vítimas mortais, uma criança e três mulheres. 45 Pessoas ficaram desalojadas.
Aluvião de 20 a 24 de Janeiro de 1979	Toda a ilha da Madeira	Aguaceiros fortes Inundações Derrocadas Casas, pontes e caminhos destruídos em toda a ilha. 14 Vítimas mortais, duas eram crianças Prejuízos de cerca de 1 milhão de contos.
Aluvião a 1 e 2 de Março de 1984	Toda a ilha	Chuvas intensas e ventos fortes provocaram derrocadas no sul e no norte da ilha.

		<p>Uma casa foi destruída, devido a uma derrocada.</p> <p>A precipitação provocou inundações no Funchal, Santa Cruz e Machico.</p> <p>A ponte do Faial desmoronou, isolando o nordeste da ilha</p> <p>Um homem foi arrastado pela ribeira dos Socorridos.</p>
Aluvião a 18 de Setembro de 1990	Funchal	<p>Trovoada e chuva forte.</p> <p>Inundações em várias ruas, em algumas a água chegou a 1m de altura, os estabelecimentos comerciais da área foram gravemente afetados e mais de uma dezena de carros, estacionados, ficaram a boiar.</p> <p>A queda de um muro</p> <p>4 Mortes, duas devido a um deslizamento e outras duas devido à queda de um muro na Rua da Penha de França sobre a Rua Carvalho Araújo, esmagando por completo um automóvel.</p>
Aluvião a 24 de Outubro de 1991	Machico, Faial, Santana e Porto Cruz.	<p>Chuvas torrenciais provocaram inundações em Machico. A ribeira subiu bastante mas não transbordou.</p> <p>No Faial, Santana e porto da Cruz houve deslizamentos e inundações.</p>
Aluvião a 29 de Outubro de 1991		<p>Ribeiros, também, transbordaram.</p> <p>Cairam pontes, casas inundadas, estradas e automóveis destruídos.</p> <p>A estrada entre Machico e a Portela ficou interrompida devido a várias derrocadas.</p>
Aluvião: temporal de 29 de Outubro de 1993	Funchal	<p>Chuva intensa e forte</p> <p>As três ribeiras (Santa Luzia, São João e João Gomes) transbordaram dos respetivos leitos, inundando a baixa do Funchal.</p> <p>Parte da cidade ficou sem abastecimento de água durante 21 dias.</p> <p>102 Habitações destruídas.</p> <p>220 Viaturas totalmente destruídas destruídos.</p> <p>Cerca de 417 pessoas desalojadas.</p> <p>8 Vítimas mortais e 3 desaparecidos</p> <p>Prejuízos avaliados em 7 milhões de contos.</p>
Aluvião a 19 e 20 de Outubro de 1997	Toda ilha	<p>A destruição da ponte velha dos socorridos e a queda da ponte de acesso à Estação de Tratamento de Água dos Tomos, na Ribeira de Santa Luzia, foram as situações mais graves.</p> <p>Houve uma enorme acumulação de pedras nos troços terminais das três ribeiras do Funchal.</p>
Aluvião de 1 de Fevereiro de 1998	Principalmente no Sul da ilha	<p>Chuva forte no sul da ilha.</p> <p>Muitas casas inundadas, vários carros arrastados.</p> <p>1 Morto, devido a um movimento de vertente.</p>

Desastres naturais no século XXI

Evento	Localização	Consequências
Aluvião a 5 e 6 de Março de 2001	A chuva foi forte em vários pontos, mas as consequências fizeram sentir-se em	<p>Ocorreram vários movimentos de vertente</p> <p>Prejuízos materiais sobretudo em infraestruturas.</p> <p>No Curral das Freiras a enxurrada soterrou e arrasou várias habitações</p>

	São Vicente e Curral das Freiras.	<p>Provocou 120 desalojadas cerca de 50 pessoas.</p> <p>5 Vítimas mortais (4 eram turistas) e 1 desaparecido.</p> <p>1 Desaparecido</p> <p>6 Casas foram destruídas.</p> <p>30 Pessoas foram evacuadas, por motivos de segurança</p> <p>Prejuízos foram cerca de 5 milhões de contos (25 milhões de euros).</p>
Aluvião: temporal de 18, 19 e 29 de Novembro de 2007	Ilha da Madeira	<p>Chuva forte, vento forte e derrocadas.</p> <p>Várias derrocadas na Estrada Regional, entre a Encumeada e o paul da Serra (ER 228).</p> <p>Os ventos fortes derrubaram várias árvores, que destruíram cabos de alta tensão no Curral dos Romeiros.</p> <p>No Funchal houve várias inundações, que danificaram algumas viaturas na zona oeste da cidade.</p>
Aluvião: temporal de 7, 8 e 9 de Abril de 2008	Ilha da Madeira, principalmente nos concelhos da R. Brava, S. Vicente, Câmara de Lobos, Funchal e Sta. Cruz	<p>Chuva intensa</p> <p>Ausência de mais informação</p>
Aluvião: temporal de 22 de Dezembro de 2009	Madalena do Mar, S. Vicente e Curral das Freiras	<p>Chuva forte e derrocadas</p> <p>Em S. Vicente a ribeira inundou vários acessos à localidade.</p> <p>Na Madalena do Mar a ribeira transbordou devido à chuva forte.</p> <p>O Curral das Freiras ficou isolado, devido a uma derrocada.</p>
Aluvião: temporal de 20 de Fevereiro de 2010 com chuva intensa	Ilha da Madeira, sobretudo, na Ribeira Brava, Câmara de Lobos, Funchal e Sta. Cruz.	<p>42 Mortos</p> <p>8 Desaparecidos</p> <p>16 Feridos</p> <p>Avultados danos materiais</p> <p>193 Famílias deslocadas, num total de 600 pessoas</p> <p>Prejuízos estimados em cerca de 1,3 mil milhões de euros.</p>
Aluvião: temporal de 5 e 6 de Novembro de 2012	Seixal, S. Vicente, Santana e Machico.	<p>Chuva forte e derrocadas</p> <p>Transbordo de ribeiros e afluentes.</p> <p>Seis feridos</p> <p>Uma vítima mortal.</p> <p>70 Pessoas desalojadas.</p> <p>Danos em 11 habitações.</p> <p>Danos em dezenas de viaturas.</p> <p>Inundações de ruas e habitações.</p>
Aluvião a 29 de Novembro de 2013	Machico - Porto da Cruz, Santana e Machico	<p>As derrocadas condicionaram 2 estradas e fecharam 4 estradas, nalgumas os terrenos cederam dezenas de metros tornando-as intransitáveis.</p> <p>6 Casas destruídas e outras parcialmente destruídas.</p> <p>Desapareceram terrenos agrícolas.</p> <p>Conduções de água potável foram destruídas.</p> <p>Postos de eletricidade foram arrancados.</p> <p>Prejuízos chegam aos 3250 milhões de euros.</p>

Fontes:

Rodrigues, D. (2005);

Quintal, R. (1999);

Silva, A. (1998) Jornal de Notícias;

http://www.in.pt/Dossies/dossie.aspx?content_id=1500024&dossier=Cat%E



14 Anexo 2 - Lista de notas técnicas produzidas

#	Produto
A1	Nota técnica sobre as metodologias mais adequadas para monitorização do caudal líquido e do transporte sólido
A2	Plano de revisão das redes de monitorização da precipitação
A3	Nota técnica sobre as metodologias para o tratamento dos dados do sistema de monitorização das aluviões
A4	Plano de desenvolvimento do sistema regional de monitorização e alerta da ocorrência de aluviões, em articulação com o Serviço Regional de Proteção Civil
B1	Definição das imagens de satélite a adquirir
B2	Proposta de metodologia baseada em análise de imagem para inventariação automática e rápida dos deslizamentos de vertentes ocorridos durante um evento catastrófico e avaliação do respetivo volume de material sólido produzido
B3-B4	Mapas de perigosidade de deslizamento para a Madeira. Estimativas de volumes de deslizamento associados aos eventos estudados
C1-C4	Carta de erosividade da precipitação. Carta de erodibilidade dos solos. Carta do fator LS. Carta de erosão específica
D1	Proposta de metodologia geral para aplicação na região do Decreto-Lei nº 115/2010
D2-D3	Caracterização preliminar das zonas com risco de inundações. Elementos base necessários à aplicação da metodologia proposta, nomeadamente curvas ou mapas de cartas de intensidade de precipitação para diferentes períodos de retorno.
D4	Utilização de ferramentas de simulação matemática para a análise de risco de aluviões
E1	Nota técnica com descrição pormenorizada da metodologia a aplicar
E2	Relatório de análise do inquérito
F1	Modelo de simulação hidrológica, para geração de escoamento superficial
F6	Livro que descreva o fenómeno dos aluviões e sintetize as principais conclusões do estudo.
F7	Relatório final do estudo