

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

Nota técnica A3

Metodologias para o tratamento dos dados do sistema de monitorização das aluviões, com proposta de critérios de alerta

Dezembro de 2017

Metodologias para o tratamento dos dados do sistema de monitorização das aluviões, com proposta de critérios de alerta

Ficha do documento	
Projecto	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	Nota Técnica A3. Metodologias para o tratamento dos dados do sistema de monitorização das aluviões, com proposta de critérios de alerta.
Autores	Rodrigo Proença de Oliveira, Cláudia Caetano, Helga Ferreira
Data	Dezembro de 2017
Versão	Versão para divulgação pública



Metodologias para o tratamento dos dados do sistema de monitorização das aluviões, com proposta de critérios de alerta

Índice de texto

Índice de texto.....	iii
Índice de quadros.....	iv
Índice de figuras.....	iv
1 Enquadramento.....	5
2 Introdução.....	6
3 O sistema de previsão e alerta.....	8
3.1 Objetivos e critérios de conceção.....	8
3.2 <i>Arquitectura</i>	8
3.3 Componentes do sistema de previsão e alerta.....	11
4 Próximos passos.....	19
5 Referências bibliográficas.....	20
6 Anexo – Revisão bibliográfica de sistemas de alerta de deslizamentos de terras.....	21

Índice de quadros

Quadro 1 - Características dos modelos numéricos de previsão ALADIN; AROME e ECMWF. ..	14
Quadro 2 - Sistemas de previsão da ocorrência de deslizamentos: operacionais (O) e protótipos (P).	23
Quadro 3 - Países com sistemas de monitorização e previsão de riscos naturais (incluindo deslizamentos)	26

Índice de figuras

Figura 1 – Proposta de arquitetura do sistema de previsão e alerta de aluviões.....	10
Figura 2 - Estação geridas pelo IPMA, consoante o seu estado actual (activa ou desactivada). 11	
Figura 3 - Estação geridas pelo IGA (e, antigamente, JG), consoante o seu estado actual (activa ou desactivada).	12
Figura 4 - Estação geridas pelo LREC, consoante o seu estado actual (activa ou desactivada)..	12
Figura 5 - Produto composto através dos radares da rede (intensidade de precipitação).	13

Metodologias para o tratamento dos dados do sistema de monitorização das aluviões, com proposta de critérios de alerta

1 Enquadramento

Este documento foi produzido no âmbito 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 complementa os trabalhos da 1ª fase do projeto e tem os seguintes objetivos estratégicos:



- Aprofundar o conhecimento sobre o fenómeno dos aluviões, melhorar a metodologia para avaliação do risco e contribuir para a implementação da Diretiva da EU sobre cheias e 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
- Desenvolver ações de divulgação pública e de formação sobre este tipo de risco.

Este documento é um dos produtos intermédios do EARAM2 e tem por principal objetivo a partilha de informação entre os elementos da equipa IST/UMa e dos vários organismos da administração regional que acompanham o projeto. Pode ser objeto de revisão e atualização frequente e deve, por isso, ser lido como documento de trabalho. A versão final do documento será integrada no relatório final do projeto.

2 Introdução

A história da ilha da Madeira está marcada por catástrofes provocadas por cheias repentinas nas ribeiras associadas ao transporte de quantidades significativas de material sólido. As chuvas torrenciais originam o aumento súbito de caudal das ribeiras e o escoamento subsequente apresenta, normalmente, um elevado poder erosivo e transportador de material sólido. Em simultâneo, pode verificar-se também a ocorrência de movimentos de vertente de grande dimensão que alimentam o escoamento das ribeiras de material sólido. No conjunto, estes fenómenos provocam graves danos materiais e vítimas humanas, destruição do coberto vegetal da ilha e ainda perda dos solos. Desde o século XVII, que existem registos de vários episódios desta natureza (enxurradas e inundações) que assumem a designação de aluviões.

O Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira (EARAM) estudou este tipo de fenómenos e, em particular, o evento ocorrido a 20 de fevereiro de 2010. O relatório final da 1ª fase do EARAM propõe um conjunto de princípios orientadores de proteção contra as aluviões, agrupados em várias áreas:

- 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;

A identificação, planeamento e orçamentação das medidas concretas que deverão ser executadas em cada bacia hidrográfica deverá ser definido no quadro do Plano de Gestão do Risco de Inundações (PGRI), uma obrigação decorrente da diretiva nº 2007/60/CE, transposta para o direito nacional através do Decreto-Lei nº 115/2010, de 22 de outubro.

De acordo com a legislação o PGRI deverá i) efetuar a avaliação preliminar de riscos de inundações e propor as zonas de riscos potenciais significativos de inundações; ii) elaborar para áreas de risco as cartas de zonas inundáveis e as cartas de risco de inundações; e iii) estabelecer um quadro de medidas de redução dos riscos de prejuízos causados por inundações.

De acordo com a referida diretiva, as medidas a incluir nos PGRI devem abranger todos os aspetos da gestão dos riscos de cheia e de inundações, centrando-se na prevenção, proteção e preparação. Devem incluir sistemas de previsão e de alerta precoce, a manutenção e/ou restauração das planícies aluviais, a promoção de práticas de utilização sustentável do solo, a melhoria da retenção da água e a inundação controlada de determinadas zonas em caso de cheia. A seleção das medidas mais adequadas deve ter em conta as características de cada bacia ou sub-bacia hidrográfica.

As particularidades das bacias hidrográficas madeirenses e do povoamento da ilha condicionam fortemente as opções disponíveis e a seleção final das medidas a incluir nos PGRI. Em concreto, as medidas de desocupação e de restauração das planícies aluvionares ou de inundação controlada de certas zonas têm uma aplicabilidade inferior à desejável, devido à escassez de terrenos propícios à ocupação humana. Por outro lado, a opção por soluções estruturais de controlo do escoamento e de proteção contra as inundações tem custos económicos, ambientais e sociais que limitam a sua aplicação de forma generalizada.

Neste contexto, 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.

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.

3 O sistema de previsão e alerta

3.1 Objetivos e critérios de conceção

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 próxima secção apresenta arquitetura da solução proposta e os seus principais componentes.

3.2 *Arquitetura*

A Figura 1 apresenta uma primeira 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 alocada 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 EARAM2.

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).

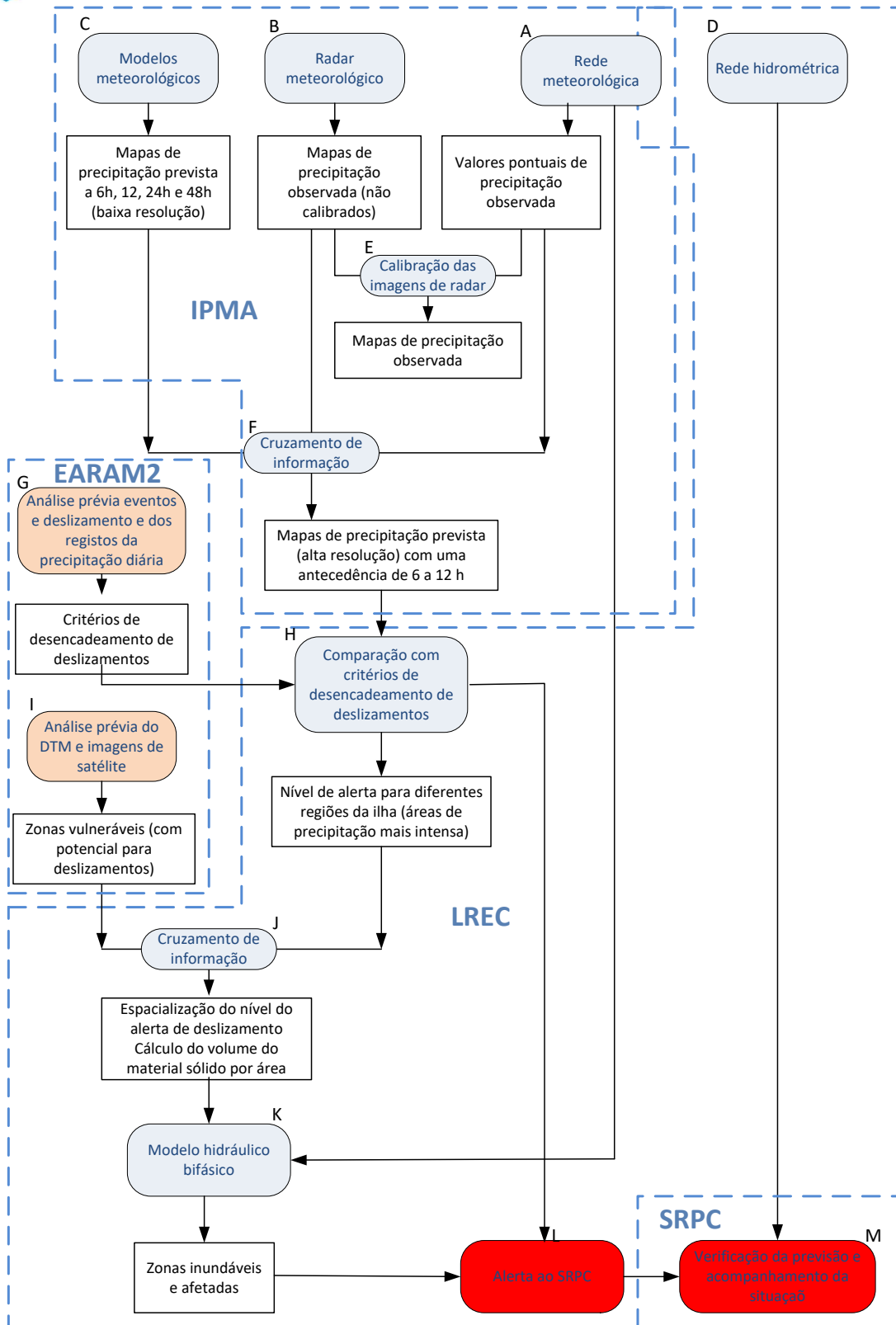


Figura 1 – Proposta de arquitetura do sistema de previsão e alerta de aluviões

3.3 Componentes do sistema de previsão e alerta

3.3.1 A - Rede de monitorização da precipitação

Atualmente, a rede de monitorização 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). As figuras apresentam as estações a cargo de cada instituição. O produto A2 do projeto apresenta uma descrição mais pormenorizada das redes de monitorização da precipitação na ilha Madeira.

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, poderá ser equacionada a fusão 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.

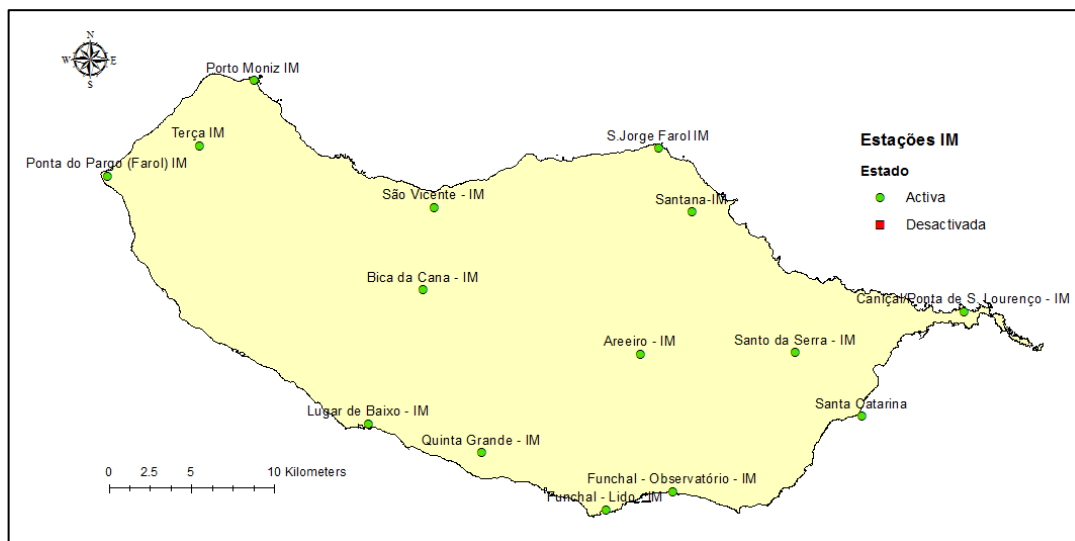


Figura 2 - Estação geridas pelo IPMA, consoante o seu estado actual (activa ou desactivada).

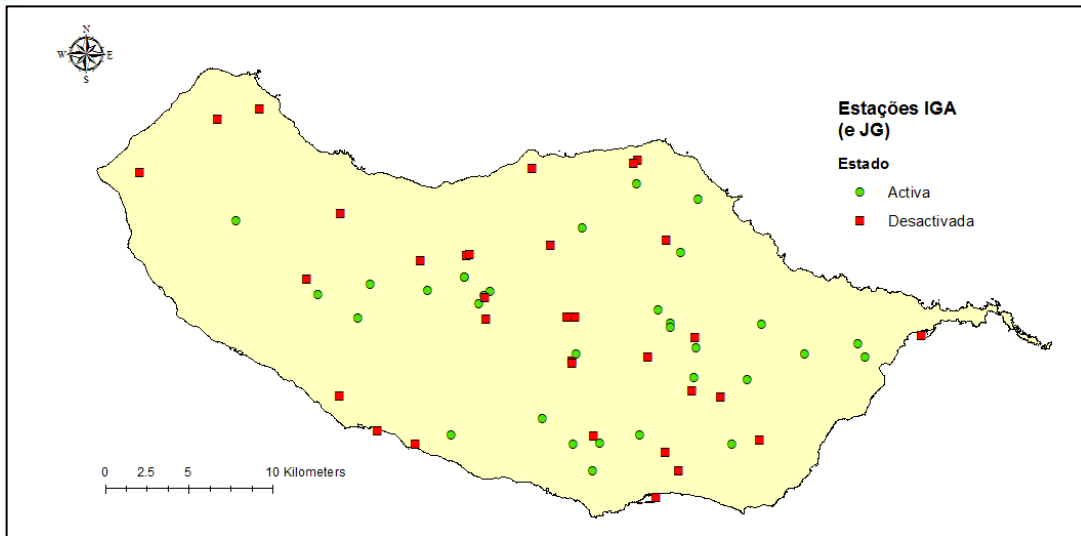


Figura 3 - Estação geridas pelo IGA (e, antigamente, JG), consoante o seu estado actual (activa ou desactivada).

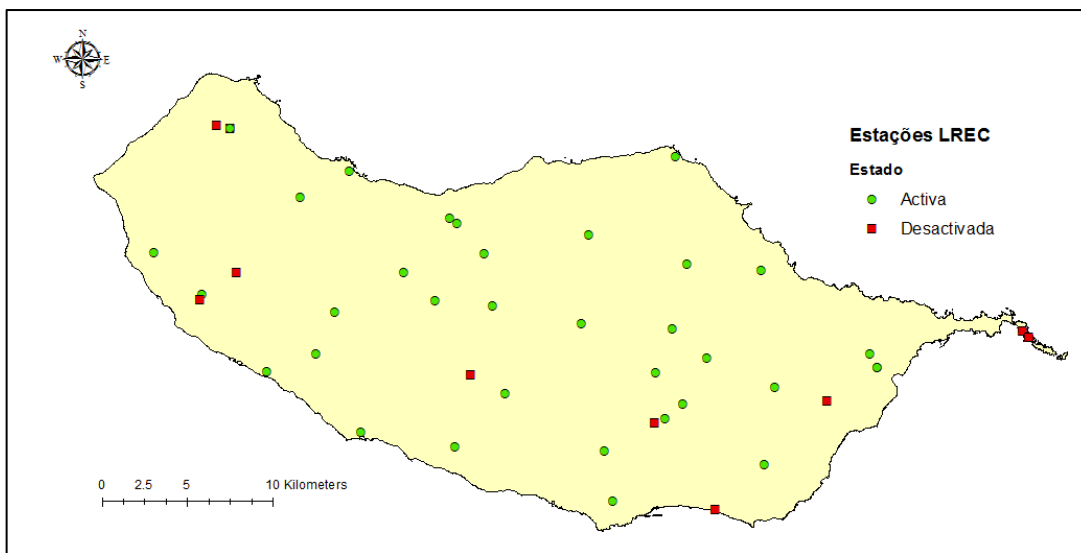


Figura 4 - Estação geridas pelo LREC, consoante o seu estado actual (activa ou desactivada).

3.3.2 B - Radares meteorológicos

Os radares meteorológicos detetam e localizam à distância gotas de chuva ou de granizo, através da medição da refletividade da radiação emitida pelo aparelho. Estas estimativas de precipitação apresentam como mais valias, em relação às medições em estações tradicionais, os factos de permitirem a estimativa da distribuição espacial da intensidade de precipitação ou da precipitação acumulada num determinado período (Figura 5) e a possibilidade de fornecerem estimativas da precipitação em locais distantes, nomeadamente no mar, onde não existem estações udométricas. As estimativas de precipitação do radar devem, no entanto, ser calibradas com medições de precipitação em estações convencionais para se obter estimativas fiáveis da distribuição espacial da precipitação.

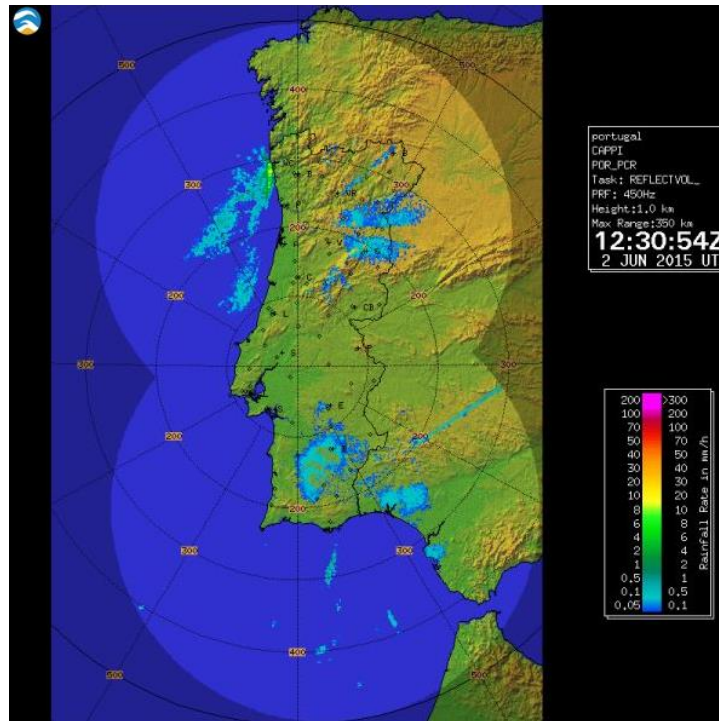


Figura 5 - Produto composto através dos radares da rede (intensidade de precipitação).

O projeto relativo à instalação de um radar meteorológico na Madeira começou a ser discutido em meados de 1980, tendo sido aprovado em dezembro de 2013, no âmbito do Programa Operacional de Valorização do Potencial Económico e Coesão Territorial da RAM (Intervir+). Após a avaliação de potenciais localizações, foi escolhido o Pico Espigão, na ilha de Porto Santo, uma vez que este local permite uma boa vigilância meteorológica da Região Autónoma da Madeira.

A instalação deste radar permitirá melhorar a qualidade e, simultaneamente, a disponibilidade dos serviços meteorológicos, em especial ao Serviço Regional de Protecção Civil da Madeira (SRPC), na área da vigilância meteorológica e hidrometeorológica. Além dos vários benefícios associados à melhoria da qualidade da previsão meteorológica, este radar irá constituir ainda uma infraestrutura tecnológica e científica na RAM, estando apto a potenciar o desenvolvimento de sinergias com diversas instituições, tais como a Universidade da Madeira (UMa) e o LREC, particularmente no domínio da investigação e desenvolvimento (I&D). Prevê-se que o radar estará operacional no primeiro trimestre de 2017.

3.3.3 C - Modelos de previsão meteorológica

A previsão meteorológica recorrendo a modelos computacionais é uma parte integrante das atividades operacionais da maioria dos serviços meteorológicos de todo o mundo. Os modelos de previsão fornecem previsões para diversas variáveis atmosféricas como a temperatura, a pressão atmosférica, o vento e a precipitação. A complexidade dos modelos de previsão, as suas limitações e as incertezas inerentes ao conhecimento da atmosfera num determinado

instante, condicionam fortemente a qualidade da informação numérica. Os resultados dos modelos são, por isso, interpretados por peritos e comparados com outras fontes de informação meteorológica de modo a elaborar a previsão do estado do tempo.

Em Portugal, mais concretamente no IPMA, os modelos operacionais atualmente em uso para previsão meteorológica no território nacional são o ALADIN, o AROME e o modelo global do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). A partir destes modelos têm sido produzidos diversos produtos, sendo que a respetiva validação dos resultados é realizada de uma forma sistemática.

O Quadro 1 sintetiza as principais características de cada modelo. O ALADIN é um modelo de área limitada, sendo objeto de desenvolvimento por parte do projeto internacional ALADIN que reúne diversos grupos de previsão numérica da Europa e do Norte de África.

O AROME é também um modelo de previsão numérica do tempo de área limitada, de alta resolução, que abrange a zona do mediterrâneo. Em Portugal, o IPMA dispõe de previsões fornecidas pelo AROME para o Continente, Madeira e Açores. A versão operacional do AROME assume como condições iniciais e de fronteira as previsões do ALADIN.

Contrariamente aos restantes, o modelo do ECMWF é um modelo global, ou seja, este efetua previsões para todo o globo. A versão deste modelo de previsão numérica que é executada apresenta-se como uma versão determinista.

Quadro 1 - Características dos modelos numéricos de previsão ALADIN; AROME e ECMWF.

Modelo	Resolução espacial		Atualização da previsão (h)	Horizonte previsto	Int. Tempo previsto (h)
	Vertical (níveis)	Horizontal (km)			
ALADIN	46	9	12	48h	1
AROME	46	2.5	12	48h	1
ECMWF	137	16	12	10dias	1

Dada a complexidade dos modelos de previsão meteorológica e a experiência do IPMA na sua utilização e análise dos seus resultados, propõe-se que, no âmbito do sistema de previsão e alerta a desenvolver para a ilha da Madeira, o IPMA assuma a responsabilidade de apresentar as previsões da precipitação que constituem os dados de entrada para a cadeia de modelos e instrumentos de análise subsequentes.

É, no entanto, importante que as estimativas de precipitação estejam associadas a resoluções espaciais e temporais e a margens de erro adequadas ao cálculo hidrológico e hidráulico exigido na Madeira. Em particular, a resolução espacial horizontal da ordem dos 10 a 20 km de alguns dos modelos é excessiva. O cruzamento dos resultados do modelo com as estimativas do radar poderá fornecer previsões associadas a uma malha de cálculo mais fina.

A análise da dinâmica das áreas de precipitação intensa observada pelo radar pode também constituir um elemento de previsão da precipitação num horizonte de poucas horas.

3.3.4 D - Estações hidrométricas

A forma tradicional de estimar caudais através da medição direta dos níveis hidrométricos do escoamento por limnímetros e posterior cálculo do caudal, através de curvas de vazão, apresenta enormes dificuldades em cursos de água torrenciais, 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.

As experiências realizadas na ilha nas décadas de 1970 e 1980 comprovam este facto. Existem algumas medições de caudal nas ribeiras da Madeira, mas os registos são curtos e apresentam um grande número de interrupções. Atualmente, a maioria das estações hidrométricas existentes na Madeira estão instaladas em levadas para medição do caudal afluente às centrais hidroelétricas.

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 câmara pode permitir medir o nível de escoamento em réguas hidrométricas ou servir para medir a velocidade superficial das aluviões (Arattano & Marchi, 2000). O ruído e a vibração associado às aluviões podem ser medidos por geofones ou acelerómetros, consoante a frequência da vibração. Os acelerómetros são mais sensíveis a vibrações e funcionam no intervalo de 0.001 a 500 Hz (Hall, 2011), enquanto os geofones ficam-se pelo intervalo de 10 a 300 Hz (Abancó, Hurlimann, Fritschi, Graf, & Moya, 2012).

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.

Este projeto está na sua fase piloto que 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 estendidas 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.

3.3.5 E – Calibração das imagens de radar

Esta atividade consiste no cruzamento dos dados de base do radar com os dados obtidos nas estações no terreno para produzir previsões melhoradas da distribuição da precipitação. Num momento prévio à operacionalização do sistema, será necessário avaliar quais as estações que devem ser utilizadas nesse processo de calibração e que tipo de correções devem ser introduzidas nas imagens originais do radar. É de esperar que essas correções tenham de ser realizadas cada vez que uma nova imagem de radar é obtida e que dependam dos valores medidos nas estações no terreno.

Em consequência, as estações a utilizar no processo de calibração, pertencentes à rede do IPMA ou às redes das instituições regionais, têm de ficar associadas a um nível de prontidão mais elevado, o que tem implicações nos processos da sua manutenção e operação. É ainda necessário definir procedimentos de calibração alternativos para o caso de falha de uma ou mais de estações udométricas.

Recomenda-se que esta tarefa seja atribuída ao IPMA, mas que seja acompanhada pelo LREC, uma vez que terá a seu cargo a coordenação da operação das redes regionais. Acresce que terá a seu cargo os passos seguintes do sistema de previsão e alerta.

3.3.6 F - Cruzamento da informação

Esta atividade tem por objetivo produzir mapas da precipitação prevista com uma resolução espacial adequada (da ordem de um ou dois km) e com uma antecedência de 6 a 12 horas. Para isso será necessário cruzar a informação obtidas dos modelos de previsão numérica do terreno, do radar meteorológicos e dos postos udométricos. O algoritmo para produzir esta tipo de previsão deverá ser objeto de investigação, logo que o radar esteja operacional.

Recomenda-se que esta tarefa seja atribuída ao IPMA, mas que seja acompanhada pelo LREC

3.3.7 G – Análise prévia dos eventos de deslizamento e dos registos de precipitação diária

Da análise conjunta dos eventos de deslizamento descritos da comunicação social e dos registos de precipitação diária do posto do Funchal (IST, 2014), resultou uma proposta de critérios para identificar o início e o final dos eventos de precipitação que podem dar origem a deslizamentos e para avaliar esse potencial de deslizamento, tendo em conta a duração do evento e a precipitação acumulada durante o evento.

A análise realizada revelou que para efeitos de identificação dos limiares de precipitação para o desencadeamento de deslizamentos na ilha da Madeira se pode considerar que um evento de precipitação tem o seu início quando a precipitação diária é superior a 4 mm e o seu término quando esse valor é inferior a 4 mm. Assim um evento é composto pela sucessão de dias em que a precipitação diária é sempre superior a 4 mm. Com esta definição, é possível calcular a

duração e a precipitação acumulada do evento. O critério identificado determina o risco de deslizamento em função desses dois parâmetros.

A aplicação deste critério na ilha da Madeira resulta num indicador de suscetibilidade de deslizamento que é apenas em função da precipitação. A adoção de outros fatores de risco como o declive e a geomorfologia do terreno, o tipo de solo e a vegetação está a ser objeto de investigação no âmbito na componente I do sistema de previsão e alerta.

Este componente do sistema foi já desenvolvido pelo IST, mas poderá ser aperfeiçoado à medida que se recolham novos dados ou que surjam ideias para metodologias de análise. Este trabalho de investigação de longo prazo poderá ser articulado pelo LREC, sugerindo projetos de investigação às instituições do sistema científico nacional e prestando apoio na disponibilização de dados.

3.3.8 H – Comparação com critérios de desencadeamento de deslizamentos

Caberá ao LREC operacionalizar a aplicação deste critério desenvolvido na componente G no quadro do sistema de previsão e alerta de cheias. Aplicando o critério desenvolvido na componente G aos mapas da precipitação prevista, é possível produzir mapas de suscetibilidade de deslizamentos que permitem identificar zonas onde a probabilidade deste tipo de acontecimento é maior.

3.3.9 I – Análise prévia de MDT e imagens de satélite

O IST está a analisar informação geográfica variada no sentido de procurar identificar relações entre os deslizamentos identificados nas imagens de satélite e várias características do terreno, nomeadamente de declive e geomorfologia do terreno, tipo de solo, coberto vegetação e variáveis meteorológicas. O cruzamento destas relações com os resultados da análise dos registos da precipitação poderá fornecer elementos mais precisos sobre os locais com maior potencial de deslizamentos, assim como sobre a área e a profundidade destes deslizamentos. Essa informação permitirá estimar volumes de material sólido que podem afluir à rede hidrográfica.

3.3.10 J – Cruzamento de informação

Caberá ao LREC operacionalizar a aplicação das metodologias desenvolvido na componente I no quadro do sistema de previsão e alerta de cheias. A médio prazo, também aqui há potencial de melhoria no quadro de programas de investigação.

3.3.11 K – Modelo hidráulico bifásico

O modelo hidráulico bifásico desenvolvido pelo IST simula, de forma integrada, o escoamento líquido e o transporte do material sólido ao longo da rede hidrográfica, permitindo determinar as áreas afetadas pelas aluviões, nomeadamente as áreas sujeitas a erosão e as áreas de deposição do material sólido. Os principais dados de entrada do modelo são as estimativas da distribuição espacial da precipitação ao longo do tempo e os volumes de material sólido

disponíveis para transporte pelo escoamento. O modelo calcula o caudal líquido afluente à rede hidrográfica, o volume de material sólido erodido, transportado e depositado e as áreas afetadas por estes processos.

No âmbito da elaboração dos Planos de Gestão do Risco de Inundação (PGRI) estão a ser elaboradas cartas de inundação e das cartas de risco recorrendo aos modelos HEC-HMS e HEC-RAS. Estes modelos não têm em consideração o transporte sólido, um processo fundamental para a compreensão do fenómeno das aluviões. A maior simplicidade destes modelos permite a sua aplicação a todas as bacias identificadas como em risco na análise preliminar dos PGRI, mas a qualidade dos seus resultados na ilha da Madeira necessita de ser aferida. Esse trabalho será realizado no âmbito do EARAM2 para os casos em que o modelo do IST foi aplicado. Pretende-se identificar as situações em que a análise simplificada, baseada nos modelos HEC, fornece resultados razoáveis e os casos em que é necessário recorrer ao modelo bifásico desenvolvido pelo IST.

Com base nos resultados dessa análise será possível concluir sobre a possibilidade de afetar fatores de correção aos resultados da modelação simplificada, sobre as necessidades de revisão das cartas de inundação e das cartas de risco desenvolvidas no quadro dos PGRI e, ainda, sobre quais os tipos de modelos que devem ser corridos em cada situação no sistema de previsão e alerta de aluviões.

Nos casos em que seja recomendável recorrer ao modelo bifásico, será necessário definir a melhor forma de proporcionar ao LREC a capacidade de obter os resultados do modelo, em situação de emergência, tendo em conta as previsões de precipitação e as estimativas de material sólido afluente à rede hidrográfica. Nos casos em que os modelos HEC sejam suficientes para fornecer uma estimativa razoável das áreas afetadas, esses modelos podem ser corridos pelo LREC.

3.3.12 L - Alerta ao SRPC

A monitorização permanente do estado do tempo é da responsabilidade do IPMA que deverá alertar o SRPC e o LREC de quadros meteorológicos passíveis de poderem desencadear aluviões. Quando alertado, o LREC deverá assumir a responsabilidade pela análise integrada dos resultados dos vários equipamentos de monitorização, das previsões apresentadas pelo IPMA e dos resultados dos instrumentos de análise e modelação, emitindo um alerta mais concreto ao SRPC, quando tal se justificar. Iniciada uma situação de emergência, o SRPC deverá assumir a gestão da situação, continuando o LREC a prestar o apoio decorrente da sua análise dos instrumentos de monitorização e modelação.

3.3.13 M – Verificação da previsão e acompanhamento da situação

A gestão da situação de emergência, com a verificação das previsões fornecidas pelo IPMA e LREC, acompanhamento da situação e mobilização dos meios de socorro é da responsabilidade do SRPC.

4 Próximos passos

Este documento propõe uma arquitetura do sistema de previsão e alerta de aluviões da ilha da Madeira, estabelecendo as responsabilidades de cada instituição com competência sobre este assunto.

Esta primeira versão foi essencialmente elaborada pelo IST, tendo o conhecimento que adquiriu nos projetos EARAM e depois de ouvidos, a título informal, várias especialistas e responsáveis por instituições regionais. É agora importante que o documento seja analisado e discutido com maior pormenor, no sentido de se encontrar uma solução consensual que permita utilizar os recursos disponíveis para emitir alertas de aluviões com uma antecedência e um rigor adequado. Da revisão e das contribuições de todos deverá surgir uma versão revista e mais pormenorizada do sistema de previsão e alerta. Essa solução, consensualizada ao nível técnico, deverá receber o acordo e o patrocínio ao nível político.

Definida a arquitetura do sistema, cada instituição deverá confirmar que assume as responsabilidades propostas neste documento e verificar se tem condições para reunir os recursos técnicos, humanos e financeiros que essa responsabilidade exige. Em paralelo, deverá ser desenvolvido um plano de implementação, devidamente calendarizado e orçamentado.

5 Referências bibliográficas

Abancó, C., Hürlimann, M., Fritschi, B., Graf, C., & Moya, J. (2012). Transformation of ground vibration signal for debris-flow monitoring and detection in alarm systems. *Sensors*, 12, 4870-4891.

Arattano, M., & Marchi, L. (2000). Video-derived velocity distribution along a debris flow surge. In *Physics and Chemistry of the Earth (Oceans and...)*, pp. 781–784.

Brunner, G. (2010). *River Analysis System (HEC-RAS) - User's Manual*. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis CA. doi:CPD-68

Cunha, P. (2010). *Medição de caudais em rios - Métodos Tradicionais versus Novos Equipamentos*. Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto.

Esteves, J., & Hughes, S. (2000). *A Monitorização Ecológica das Águas Superficiais da RAM*. Funchal, Madeira.

Hall, M. (julho de 15 de 2011). Geophysical stamps 3: Geophone. Obtido em 15 de agosto de 2015, de <http://www.agilegeoscience.com/journal/2011/7/15/geophysical-stamps-3-geophone.html>

IST, 2014. Limiars de precipitação para o desencadeamento de deslizamentos na ilha da Madeira, in CENOR/NORVIA, 2014, Estabelecimento de Metodologias, de Parâmetros de Base e de Ferramentas Informáticas para a Realização de Estudos de Cheias na Ilha da Madeira. Relatório final.

IPMA. (n.d.). IPMA - RADARES Meteorológicos. *Lisboa*. Retrieved June 5, 2015, from <https://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=radar01.xml>

MARN, SRES, & IA. (1994). *CAUDAIS para o séc. XXI - Região Autónoma da Madeira*. Lisboa/Funchal, Portugal.

Mendes, M. (2008). *10 Anos de estações automáticas: perspectivas para a caracterização do clima em Portugal*. Faculdade de Ciências - Universidade de Lisboa. Tese de Mestrado.

Scharffenberg, W. A. (2013). *Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) - User's Manual*. Washington, EUA.

6 Anexo – Revisão bibliográfica de sistemas de alerta de deslizamentos de terras

Um sistema de monitorização e previsão pode ser descrito como um conjunto de ações necessárias para atempadamente produzir e difundir informações úteis a indivíduos, populações ou organizações em risco, para que estas possam agir, adequadamente e em tempo útil, por forma a reduzir a possibilidade de dano ou perda. Os deslizamentos continuam a ter um enorme impacto na sociedade contemporânea resultando na morte de milhares de pessoas e originando elevados custos em danos (1), (2), (3).

A avaliação dos deslizamentos pode ser realizada em diferentes escalas espaciais, distinguindo-se geralmente as abordagens regional ou local. Os modelos regionais estabelecem relações estatísticas entre fatores que condicionam e/ou desencadeiam a ocorrência de deslizamentos e a distribuição dos deslizamentos já ocorridos. Emitem avisos para determinada área não sendo possível identificar o local exato da instabilidade. Os modelos locais são modelos construídos para uma instabilidade específica, baseando-se em dados recolhidos através de uma investigação detalhada do processo de rutura, tais como, características geotécnicas (ângulo de atrito interno, coesão, etc.), medições de deslocamentos ou vibrações do solo ou medição de parâmetros hidrológicos, como por exemplo o nível freático.

Atualmente existe uma preocupação crescente no desenvolvimento de sistemas de monitorização e previsão de deslizamentos por todo o mundo. O estabelecimento dos valores limite a partir do qual há probabilidade de ocorrer um deslizamento é um ponto-chave no desenvolvimento de um sistema de previsão. Os fatores desencadeantes naturais mais comuns estão relacionados com a geologia (sismos, erupções vulcânicas) ou com a hidrologia (precipitação, degelo repentino ou alteração do nível freático no sopé de taludes) (4). A intervenção humana também pode desencadear deslizamentos pela aplicação de sobrecargas elevadas em taludes ou pela alteração geomorfológica destes através de escavação ou corte do declive. Por outro lado, há um conjunto de fatores condicionantes que influenciam a ocorrência dos deslizamentos, tais como, ocupação do solo, geologia ou declive.

O trabalho apresentado por *Caine*, 1980 (5) é dos mais influentes na área, o autor estabeleceu os valores limite baseado na intensidade e na duração dos eventos de precipitação que produziram ou não deslizamentos. Desde então, vários trabalhos foram apresentados para outros locais e analisadas diferentes características da precipitação. Os limiares de desencadeamento mais aplicados são expressos como intensidade e duração da precipitação ou precipitação acumulada do evento e precipitação acumulada antecedente ao evento. Artigos de revisão sobre fatores desencadeantes de deslizamento podem ser encontrados na literatura (6) (7) (8) (9).

No Quadro 2 são expostos diversos trabalhos desenvolvidos na área da previsão da ocorrência de deslizamentos sendo apresentados modelos regionais (10) e locais (11), assim como, é

apresentada a referência da integração do sistema numa estrutura governamental (operacional) ou não (protótipo).

Os limiares de desencadeamento de deslizamentos diferem no espaço e no tempo. Diferem de uma região para outra com base nas propriedades hidroclimatológicas, hidrogeológicas e geofísicas desse mesmo local. Também podem variar no tempo, por exemplo apresentando valores inferiores após a ocorrência de um sismo (12) ou apresentando maior resistência após a ocorrência de deslizamentos devido à menor disponibilidade de material para ser transportado (13).

Um elevado número de sistemas de previsão é baseado apenas nos limiares de precipitação. São sistemas que não se encontram na sua maioria ligados a entidades governamentais e deste modo não emitem avisos. No entanto, são um dos primeiros passos para o desenvolvimento de um sistema de monitorização e previsão. Países como a Noruega, a Suíça, o Canada e os Estados Unidos da América, possuem sistemas de monitorização e previsão de fenómenos naturais incluindo a ocorrência de deslizamentos que se encontram implementados como medidas de atenuação numa abordagem integrada da gestão do risco (Quadro 3 **Error! Reference source not found.**). Esta gestão está ao cargo de entidades governamentais tendo como foco a identificação, a monitorização e previsão deste tipo de fenómeno, assim como, a sensibilização da população ao risco e a comunicação de avisos ou alertas à população local em tempo útil.

Em conclusão, o desenvolvimento urbano continua a levar à invasão de zonas mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos. Aliado ao facto dos eventos de precipitação serem mais frequentes e/ou mais intensos em muitas regiões (14), faz com que os sistemas de monitorização e previsão sejam cada vez mais importantes como uma ferramenta de mitigação do risco, o que já se verifica em vários países desenvolvidos (Quadro 3).

Os deslizamentos são um fenómeno complexo e a sua previsão é um problema multivariado, onde se incluem os fatores desencadeantes e condicionantes. A eficiência de previsão depende não só dos modelos de previsão utilizados como da qualidade (extensão, duração, escala, etc.) e da fiabilidade dos dados adquiridos.

A incerteza está sempre presente na previsão de fenómenos naturais como é o caso dos deslizamentos. A fonte de incerteza mais importante para este tipo de fenómeno provém da variabilidade espacial e temporal dos eventos de precipitação. A redução da incerteza pode ser alcançada através da instalação de sistemas de monitorização mais sofisticados e/ou com uma rede de pontos de aquisição de dados mais densa. Não obstante, são necessários vários anos de monitorização para calibrar um modelo de previsão uma vez que são necessários dados suficientes no espaço, mas também no tempo. Toda esta informação contribui para a construção de um sistema de monitorização e previsão robusto e fiável.

Quadro 2 - Sistemas de previsão da ocorrência de deslizamentos: operacionais (O) e protótipos (P).

Ref.	Local	Sistema	Componentes	Tipo de sistema
(15)	Nepal Himalaias	Sistema baseado em limiares de precipitação	Intensidade e duração da precipitação	P
(16)	Suíça, Alpes, Illgraben	Sistema baseado na vibração do solo e do fluxo no leito do rio.	Vibração do solo Profundidade de fluxo no leito do rio	O
(12)	China, Taiwan	Sistema baseado em limiares de precipitação	Intensidade de precipitação efectiva Precipitação (antecedente) acumulada efectiva	P
(17)	China, Taiwan	Sistema baseado em limiares de precipitação e geologia	Intensidade e duração da precipitação Precipitação antecedente	P
(18)	Brasil, Santa Catarina	Sistema baseado em limiares de precipitação e características mecânicas do solo	Ângulo de atrito interno e coesão Densidade das partículas Análise granulométrica Precipitação horária	O
(19)	Indonésia	Sistema baseado em limiares de precipitação e nível de água.	Precipitação Nível de água Monitorização visual	O
(10)	Canada, Vancouver	Sistema baseado em limiares de precipitação	Precipitação antecedente Intensidade de precipitação	O
(11)	Itália, Torgiovannetto	Sistema baseado em limiares de precipitação, geologia e caracterização cinética da instabilidade rochosa	Deslocamentos Temperatura Precipitação Monitorização visual	O
(4)	Itália, Piedmon	Sistema baseado em limiares de precipitação	Intensidade e duração da precipitação Precipitação antecedente	P

Ref.	Local	Sistema	Componentes	Tipo de sistema
(20)	Reino Unido, West Dorset, Lyme Regis	Sistema baseado em limiares de precipitação, na inclinação e no nível freático	Inclinação Nível de água Precipitação	O
(21)	Estado Unidos da América, Washington, Seattle	Sistema baseado em limiares de precipitação	Precipitação acumulada Intensidade e duração de precipitação Teor de água do solo Profundidade da neve Temperatura	P
(22)	Austrália, New South Wales, Wollongong	Sistema baseado em limiares de precipitação	Inclinação Pressão da água nos poros Precipitação	P
(23)	Colômbia, Ibagué, Combeima Valley	Sistema baseado em limiares de precipitação, vibração do solo e informação de potenciais situações de deslizamento reportadas por residentes.	Precipitação acumulada Vibração do solo	O
(24)	Nova Zelândia, Wellington	Sistema baseado em limiares de precipitação	Precipitação diária Precipitação antecedente	P
(25)	Itália, Alpes ocidentais, Torino, Susa Valley	Sistema baseado em características litológicas, geomorfológicas e condições atmosféricas	Geologia Declive Uso do solo Distribuição granulométrica Modelo digital do terreno Precipitação acumulada Precipitação antecedente Intensidade de precipitação	P

Ref.	Local	Sistema	Componentes	Tipo de sistema
(26)	China, Yunnan, Jiangjia Ravine	Sistema baseado em limiares de precipitação	Intensidade e duração da precipitação Precipitação acumulada Precipitação antecedente	O
(27)	Nova Zelândia, Ilha Norte	Sistema baseado em limiares de precipitação	Intensidade da precipitação Precipitação acumulada antecedente	P
(6)	Europa Central e Sul	Sistema baseado em limiares de precipitação	Intensidade e duração da precipitação	P
(28)	Itália, Cancia, Alpes Dolomíticos	Sistema baseado em limiares de precipitação	Intensidade e duração da precipitação Precipitação média anual	O
(29)	Itália, Toscana	Sistema baseado em limiares de precipitação	Intensidade e duração da precipitação Precipitação média anual	P
(1)	Canada, Alberta	Sistema baseado no deslocamento da massa rochosa	Inclinação Deslocamento	O

Quadro 3 - Países com sistemas de monitorização e previsão de riscos naturais (incluindo deslizamentos).

País	Entidade
Noruega	Norwegian Public Road Administration, National Rail Administration, Meteorological Institute, Water Resources and Energy Directorate
Japão	Early Warning Sub-Committee of the Inter-Ministerial Committee on International Cooperation for Disaster Reduction, Government of Japan
Estados Unidos da América (São Francisco, Califórnia, Seattle, Alasca)	U.S. Geological Survey, Landslide Hazards Program
Islândia	Icelandic Meteorological Office
Reino Unido	Natural Hazards Partnership
Áustria	The Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management
Suíça	The Swiss Confederation warns of natural hazards

- (1) Froese, C. R., and Moreno, F. (2014) Structure and components for the emergency response and warning system on Turtle Mountain, Alberta, Canada. *Natural Hazards* 70, 1689-1712.
- (2) Choi, K. Y., and Cheung, R. W. M. (2013) Landslide disaster prevention and mitigation through works in Hong Kong. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 5, 354-365.
- (3) UNISDR (2009) *Terminology*, Geneva.
- (4) Aleotti, P. (2004) A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology* 73, 247-265.
- (5) Caine, N. (1980) The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography* 62, 23-27.
- (6) Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. (2007) Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics* 98, 239-267.
- (7) Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. (2008) The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5, 3-17.
- (8) Polemio, M., and Petrucci, O. (2000) Rainfall as a landslide triggering factor: An overview of recent international research, in *Landslides in research, theory and practice* pp 1219-1226, Thomas Telford, London.
- (9) Brunetti, M. T., Luino, F., Vennari, C., Peruccacci, S., Biddoccu, M., Valigi, D., Luciani, S., Cirio, C. G., Rossi, M., Nigrelli, G., Ardizzone, F., Di Palma, M., and Guzzetti, F. (2013) Rainfall Thresholds for Possible Occurrence of Shallow Landslides and Debris Flows in Italy, in *Dating Torrential Processes on Fans and Cones: Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment* pp 327-339, Springer Netherlands, Dordrecht.
- (10) Jakob, M., Owen, T., and Simpson, T. (2012) A regional real-time debris-flow warning system for the District of North Vancouver, Canada. *Landslides* 9, 165-178.
- (11) Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., and Casagli, N. (2012) Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology* 147–148, 124-136.
- (12) Shieh, C.-L., Chen, Y.-S., Shieh, M.-L., and Tsai, Y.-J. (2006) Rainfall Criteria Variation of Debris Flow Occurring at Mt. Ninety-Nine. *Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*, 167-175.
- (13) Crozier, M. J., and Preston, N. J. (1999) Modelling changes in terrain resistance as a component of landform evolution in unstable hill country, in *Process Modelling and Landform Evolution* pp 267-284, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- (14) Gariano, S. L., and Guzzetti, F. (2016) Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews* 162, 227-252.
- (15) Dahal, R. K., and Hasegawa, S. (2008) Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology* 100, 429-443.
- (16) Sättele, M., Bründl, M., and Straub, D. (2015) Reliability and effectiveness of early warning systems for natural hazards: Concept and application to debris flow warning. *Reliability Engineering & System Safety* 142, 192-202.
- (17) Chien-Yuan, C., Tien-Chien, C., Fan-Chieh, Y., Wen-Hui, Y., and Chun-Chieh, T. (2005) Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring. *Environmental Geology* 47, 715-724.
- (18) Michel, G. P., Goerl, R. F., and Kobiyama, M. (2015) Critical rainfall to trigger landslides in Cunha River basin, southern Brazil. *Natural Hazards* 75, 2369-2384.
- (19) Hardjosuwarno, S., Bambang Sukatja, C., and Tata Yunita, F. (2013) pp 22, Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015.
- (20) Cole, K., and Davis, G. M. (2002) in *International Conference on Instability - Planning and Management*, Thomas Telford.
- (21) Baum, R. L. (2007) in *Proceedings of the first North America landslide conference* (Publication, A. o. E. G. S., Ed.) pp 1-14, Vail Colorado, USA.
- (22) Flentje, P. N., Chowdhury, R. N., Tobin, P., and Brizga, V. (2005) in *International conference on landslide risk management* (Hungar O, F. R., Couture R, Eberhardt E, Ed.) pp 741-751, Taylor & Francis Ltd, Vancouver.

- (23) Huggel, C., Ramírez, J. M., Calvache, M., González, H., Gutierrez, C., and Krebs, R. (2008) A landslide early warning system within an integral risk management strategy for the Combeima-Tolima Region, Colombia. *The international disaster and risk conferences*, 273-276.
- (24) Crozier, M. J. (1999) Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model *Earth Surf Proc Land* 24, 825-833.
- (25) Tiranti, D., Bonetto, S., and Mandrone, G. (2008) Quantitative basin characterisation to refine debris-flow triggering criteria and processes: an example from the Italian Western Alps. *Landslides* 5, 45-57.
- (26) Guo, X.-j., Cui, P., and Li, Y. (2013) Debris flow warning threshold based on antecedent rainfall: A case study in Jiangjia Ravine, Yunnan, China. *Journal of Mountain Science* 10, 305-314.
- (27) Glade, T., Crozier, M., and Smith, P. (2000) Applying Probability Determination to Refine Landslide-triggering Rainfall Thresholds Using an Empirical “Antecedent Daily Rainfall Model”. *pure and applied geophysics* 157, 1059-1079.
- (28) Bacchini, M., and Zannoni, A. (2003) Relations between rainfall and triggering of debris-flow: case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 3, 71-79.
- (29) Giannecchini, R., Galanti, Y., and D'Amato Avanzi, G. (2012) Critical rainfall thresholds for triggering shallow landslides in the Serchio River Valley (Tuscany, Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 829-842.