

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

## Nota técnica A1

Metodologias mais adequadas para  
monitorização do caudal líquido e do  
transporte sólido

**Dezembro de 2017**



# Metodologias mais adequadas para monitorização do caudal líquido e do transporte sólido

<b>Ficha do documento</b>	
<b>Projecto</b>	Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira - Fase 2
<b>Coordenação</b>	António Betâmio da Almeida (IST), Rodrigo Proença de Oliveira (IST), Paulo França (UMa)
<b>Cliente</b>	Governo Regional da Madeira / Direção-regional de Infraestruturas e Equipamentos
<b>Documento</b>	Nota Técnica A1. Metodologias mais adequadas para monitorização do caudal líquido e do transporte sólido
<b>Autores</b>	António Betâmio de Almeida; Rodrigo Proença de Oliveira; Paulo França; Rui Ferreira; Sara Araújo; Lisandra Camacho
<b>Data</b>	Dezembro de 2017
<b>Versão</b>	Versão para divulgação pública



# Metodologias mais adequadas para monitorização do caudal líquido e do transporte sólido

## Índice de texto

Índice de texto.....	iii
Índice de figuras .....	iv
Índice de quadros.....	v
1 Enquadramento .....	1
2 Âmbito e Objetivos .....	2
3 Equipamentos de monitorização de aluviões.....	3
3.1 Câmaras de vídeo .....	4
3.2 Sensores de nível.....	6
3.2.1 Sensores ultrassónicos .....	6
3.2.2 Sensor com tecnologia de radar.....	9
3.3 Geofones e sismógrafos .....	11
3.4 Udógrafos para monitorização da precipitação.....	13
4 Sistemas de monitorização .....	16
4.1 Taiwan .....	16
4.2 Torrente de Moscardo, Itália.....	18
4.3 Sistema MonitorizaRibeiras, Ilha da Madeira .....	21
4.4 Erlenbach, Suíça .....	29
4.5 Rio Arimura, Japão .....	30
5 Conclusões .....	32
6 Referências bibliográficas .....	33

## Índice de figuras

Figura 1 – Câmara de vídeo do Sistema MonitorizaRibeiras. ....	5
Figura 2 – Sensor de nível ultrassónico do Sistema MonitorizaRibeiras.....	7
Figura 3 – Colocação do sensor perpendicularmente ao fluxo do canal. ....	7
Figura 4 – Sensor de nível com tecnologia de radar do Sistema MonitorizaRibeiras.....	10
Figura 5 – Sensores de vibração do Sistema MonitorizaRibeiras: Acelerómetro (A) e Geofone (B). .....	12
Figura 6 – Udógrafo de alarme do Sistema MonitorizaRibeiras. ....	14
Figura 7 – Distribuição das 22 estações de monitorização <i>in situ</i> em Taiwan (A) e Estação de monitorização móvel (B). ....	17
Figura 8 – Torrente de Moscardo. 1: zona de iniciação das aluviões; 2: udómetros; 3 e 4: trechos instrumentados. ....	19
Figura 9 – Localização das secções instrumentadas. ....	20
Figura 10 – Âmbito Geográfico do Projeto MonitorizaRibeiras. ....	23
Figura 11 – Representação esquemática da rede de telecomunicações. ....	25
Figura 12 – Identificação das secções monitorizadas no concelho do Funchal. ....	27
Figura 13 – Identificação das secções monitorizadas no concelho da Ribeira Brava. ....	28
Figura 14 – Sistema de Basket Samplers (Rickenmann, Turowski, Fritschi, Klaiber, & Ludwig, 2012). ....	29
Figura 15 – Sistema de monitorização composto por células de carga e uma placa em aço (1), um sensor ultrassónico e um sensor de velocidade (2), sensores de pressão (3) e uma câmara de vídeo (4) (Osaka, Utsunomiya, Tagata, Itoh, & Mizuyama, 2014). ....	31

## Índice de quadros

Quadro 1 – Características gerais sobre as bacias em estudo. ....	22
---	----

# Metodologias mais adequadas para monitorização do caudal líquido e do transporte sólido

## 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 da 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 Âmbito e Objetivos

As ribeiras da Ilha da Madeira apresentam características típicas de rios de montanha, correndo em vales geralmente profundos e estreitos. Quase todas as principais ribeiras apresentam desníveis superiores a 1200 m, em extensões que raramente atingem os 20 km (Procesl, ProSistemas, Prima, 2003). Com efeito, as características naturais da Ilha da Madeira favorecem a ocorrência de eventos, que são caracterizados por cheias rápidas e violentas, com transporte de material sólido em concentrações elevadas.

Perante estas condições, a exploração e manutenção de qualquer rede hidrométrica na Ilha da Madeira é bastante difícil, devido à ocorrência de desprendimentos e arrastamentos de blocos rochosos que obstruem as secções de medição e danificam os equipamentos e estruturas existentes, com conseqüente interrupção da medição das alturas hidrométricas (Prada, 2005). Além disso, as características específicas da Ilha da Madeira condicionam a fiabilidade dos sistemas de aviso deste tipo de fenómenos que resultam de processos complexos que envolvem padrões de precipitação excecionais em intensidade e duração e situações de instabilidade latente ou de potencial mobilização de material sólido.

Após a realização de uma extensa pesquisa bibliográfica, verificou-se que estas dificuldades também são sentidas em outras zonas do mundo onde fenómenos semelhantes ocorrem com frequência e com grande perigosidade e que embora existam diversos equipamentos para a monitorização do caudal líquido e do transporte sólido, os mesmos, em regra, não são adequados para rios ou cursos de água de montanha que mobilizam elevadas quantidades de material sólido.

O historial de ocorrências de aluviões e a avaliação do risco associado constitui uma justificação para a necessidade de criação do Sistema MonitorizaRibeiras, que tendo por base a experiência internacional, foi adaptado às condições locais da região.

Os sistemas de monitorização de aluviões estão vocacionados para duas vertentes: a prevenção e a calibração de modelos de simulação dos fenómenos. Na ótica da prevenção algumas medidas já se encontram implementadas, como é o caso da construção das

barreiras de retenção de material sólido. No que respeita à elaboração de modelos de simulação, e embora o Sistema MonitorizaRibeiras se encontre montado e a funcionar, é necessário aos poucos dar robustez ao mesmo, com vista a futura previsão de caudais e cotas máximas de inundação nas secções críticas das ribeiras monitorizadas.

A experiência empírica acumulada por estudos e recolha de dados específicos e sistemáticos, e a melhoria nos sistemas de previsão, têm permitido a implementação de sistemas mais adaptados de proteção e de mitigação do risco em algumas zonas do mundo. Em Portugal, salienta-se o estudo agora elaborado para a DRIE da Região Autónoma da Madeira que, através da Tarefa A1, comporta os seguintes objetivos:

- Apresentação e descrição dos equipamentos maioritariamente empregues em sistemas de monitorização, enunciando vantagens e desvantagens;
- Pesquisa bibliográfica de sistemas de monitorização de aluviões;
- Descrição do Sistema MonitorizaRibeiras, recentemente implementado na Ilha da Madeira.

### **3 Equipamentos de monitorização de aluviões**

Os sistemas de monitorização funcionam como uma ferramenta importante para o estudo das aluviões, permitindo registar informações essenciais acerca da iniciação e do comportamento destes fenómenos ao longo do seu percurso, bem como acerca do processo de deposição. Através da monitorização é possível alertar as entidades competentes sobre um desastre iminente, como também desenvolver modelos computacionais de previsão de futuros eventos (Graf & McArdell, 2009), (Itakura, Inaba, & Sawada, 2005). Um aspeto importante é desenvolver um sistema fiável e robusto que possa ser adaptado ao curso de água em questão de maneira a poder funcionar como um sistema de prevenção.

São vários os equipamentos utilizados na instrumentação de aluviões e dos canais por onde esta circula. Alguns autores (Itakura, Inaba, & Sawada, 2005) realizaram um compêndio de equipamentos e métodos, bem como os parâmetros que tais equipamentos conseguem registar.

De acordo com estes autores, os sensores de fio, os sensores ultrassónicos, os sensores de vibração do solo e as técnicas de processamento de imagem são os meios mais indicados para a deteção da aproximação de uma aluvião. Enquanto os sensores ultrassónicos são capazes de determinar a profundidade e a velocidade do fluxo, os sensores de vibração do solo, algumas técnicas de processamento de imagem e as células de carga podem estimar o caudal transportado pelo curso de água.

As páginas seguintes descrevem os equipamentos mais utilizados em diversas estações de monitorização, tais como, câmaras de vídeo, sensores ultrassónicos, sensores com

tecnologia de radar, geofones e sismógrafos e equipamentos para registo da precipitação. Depois desta descrição serão apresentadas as vantagens e desvantagens de cada aparelho na temática das aluviões e monitorização de cursos de água.

### 3.1 Câmaras de vídeo

As câmaras de vídeo, *vide* Figura 1, são dos equipamentos mais utilizados em sistemas de monitorização. A sua utilização tem como função a deteção da ocorrência das aluviões (Arattano & Marchi, 2008), permitem calcular a velocidade superficial do escoamento (Arattano & Grattoni, 2000) e determinar o caudal transportado (Itakura, Inaba, & Sawada, 2005).

Devido à presença de seixos de grandes dimensões e outros fragmentos presentes no corpo de um fluxo de detritos (*debris flow* na literatura de língua inglesa), conjuntamente com a dificuldade em prever a magnitude e ocorrência destes eventos, não é possível a utilização de técnicas e aparelhos de medição de velocidade utilizados em canais de água limpa e pouco turbulenta. Assim, a utilização de uma câmara surge como solução ao problema da medição da velocidade superficial das aluviões (Arattano & Marchi, 2000). Avanços recentes na técnica *Large Scale Particle Image Velocimetry* (Zhang et al. 2013) poderão conduzir a medições com elevada fiabilidade.



Figura 1 – Câmara de vídeo do Sistema MonitorizaRibeiras.

Arattano e Marchi (Arattano & Marchi, 2000) realizaram uma análise a diversas aluviões ocorridas na Torrente de Moscardo, localizada nos Alpes Italianos. Foram utilizados diversos equipamentos de monitorização, entre eles sensores ultrassónicos e câmaras de vídeo, tendo os autores procedido a uma comparação entre as medições de velocidade obtidas por estes equipamentos. Os autores chegaram à conclusão que os resultados obtidos eram muito semelhantes e que as discrepâncias existentes podiam ser atribuídas a aproximações nos métodos de medição e aos diferentes comprimentos de cada secção do canal considerado.

#### ***Vantagens***

- É um equipamento que não necessita de estar em contacto com a aluvião, logo dificilmente será prejudicado por impactos de sólidos transportados pela da corrente;
- Instalação segura: a câmara pode ser colocada nas laterais do canal.

#### ***Desvantagens***

- A presença de nevoeiro pode dificultar a captação de imagens;

- A ocorrência de uma aluvião à noite poderá não ser registada pela câmara.

### 3.2 *Sensores de nível*

#### 3.2.1 *Sensores ultrassónicos*

Os sensores ultrassónicos são, provavelmente, dos equipamentos mais utilizados para a monitorização contínua do nível dos fluxos de detritos, podendo, para além de registar os gráficos da cota de escoamento, analisar o estado de erosão do canal (Arattano & Marchi, 2008). Na Figura 2 encontra-se representado o sensor de nível ultrassónico utilizado no Sistema MonitorizaRibeiras.

O princípio de funcionamento dos sensores ultrassónicos baseia-se na emissão de um som sob forma de pulso que é refletido quando este encontra um material. O som refletido é então recebido pelo sensor. O tempo para que o feixe do sensor ultrassónico chegue ao material e volte para trás é diretamente proporcional à distância entre o sensor e o material em causa. A deteção por parte dos sensores é afetada por determinados fatores respeitantes ao material a monitorizar, como as características da superfície, a distância ao sensor, o tamanho e o ângulo.

A correta montagem do equipamento é importante para assegurar que as ondas sonoras sejam refletidas perpendicularmente para o sensor, pois o menor desalinhamento do sensor pode provocar uma redução da onda detetada pelo transdutor (Stevens Water Monitoring Systems).



Figura 2 – Sensor de nível ultrassónico do Sistema MonitorizaRibeiras.

A zona de instalação do sensor deve estar relativamente livre de obstáculos como suportes ou escadas de maneira a minimizar falsos retornos e a resultante deteção de dados errados.

Estes sensores são colocados sobre o canal (*vide* Figura 3) e registam a distância que separa o nível da corrente e o respetivo sensor, sendo possível desta maneira registar os gráficos do perfil de escoamento da aluvião.



Figura 3 – Colocação do sensor perpendicularmente ao fluxo do canal.

Outro aspeto a ter em conta é o facto de os sensores ultrassónicos terem de ser colocados sobre o canal, o que os torna mais suscetíveis a estragos e, se as margens do canal forem instáveis, a sua colocação pode tornar-se morosa e difícil. Como vantagem apresentam a facilidade de definição de níveis de alerta: numa secção do canal de dimensões conhecidas é possível estabelecer um nível crítico da altura do escoamento que, caso seja ultrapassado, implica a emissão de um alerta.

Com este equipamento é também possível determinar a velocidade média da frente da vaga (Arattano & Marchi, 2000), (Arattano & Marchi, 2008). Através da colocação de um par de sensores a uma distância conhecida, a velocidade média da frente é determinada como sendo o rácio da distância entre os sensores e o intervalo de tempo que decorreu entre a passagem da frente nos dois locais instrumentados.

### ***Vantagens***

- A resposta do sensor não está dependente da cor da superfície ou da refletividade do material;
- São capazes de detetar a maior parte dos materiais com refletividade acústica suficiente;
- Facilmente instalados numa ponte ou numa estrutura sobre a água;
- Não estão em contacto com o material a monitorizar;
- Pouco sujeitos a sujidade ou corrosão;
- Baixo custo e elevada funcionalidade;
- Relativo baixo consumo de energia.

### ***Desvantagens***

- Podem ser falsamente acionados devido a ruídos altos;
- Para uma deteção eficaz, cada tipo de sensor requer uma área mínima de superfície;
- Têm uma distância mínima de alcance;
- A distância máxima à superfície do nível da água é cerca de 9 m ou menos (varia de sensor para sensor);
- Sensibilidade a mudanças de temperatura, pressão, humidade e a partículas suspensas no ar;
- Superfícies lisas refletem mais facilmente a energia que superfícies rugosas, no entanto, o ângulo de deteção de uma superfície lisa é mais crítico que o mesmo relativo a uma superfície rugosa;
- O recetor pode perder o sinal refletido de uma superfície muito inclinada (a existência de irregularidades na superfície minimiza este efeito);

- A presença de detritos, nevoeiro, espuma ou elevada turbulência na água pode provocar leituras menos exatas;
- Concentrações elevadas de material fino em suspensão podem causar a dispersão e absorção da onda sonora, evitando a sua reflexão;
- Geralmente requerem mais energia que outros sensores de medição do nível da água;
- A acumulação de água na cabeça do sensor ou a simples condensação podem provocar problemas de funcionamento.
- Normalmente requerem calibração periódica – VERIFICAR SE É O CASO!!

### 3.2.2 Sensor com tecnologia de radar

Radar é um acrónimo de *Radio Detecting and Ranging*. É um aparelho que transmite e recebe energia eletromagnética sob a forma de ondas rádio como forma de detetar e estimar a distância e/ou a velocidade de um objeto. Tal como o sensor ultrassónico, o princípio de funcionamento é em todo semelhante: é transmitido um sinal através do ar por parte do sensor para o líquido e o tempo que o eco demora a voltar é registado de maneira a fornecer um registo contínuo do nível. Podem, igualmente, ser suspensos sobre o canal. Na Figura 4 encontra-se ilustrado o sensor de radar utilizado no MonitorizaRibeiras.



Figura 4 – Sensor de nível com tecnologia de radar do Sistema MonitorizaRibeiras.

O sensor radar de nível tem a mesma utilidade que o sensor ultrassónico: medir o nível de escoamento numa determinada secção do canal e determinar a velocidade média das frentes das vagas de uma aluvião.

#### ***Vantagens***

- Não estão em contacto com o material a monitorizar;
- Não requerem grandes cuidados de manutenção;
- Equipamentos com maior alcance;
- Geralmente mais precisos que os sensores ultrassónicos;
- Melhor performance em relação aos sensores ultrassónicos na deteção através de pó, vapor e espuma;

- Não são afetados significativamente por variações de temperatura ou precipitações moderadas.

#### ***Desvantagens***

- São sensíveis à acumulação de partículas na superfície do sensor;
- Dependendo da densidade do neveiro, não conseguem devolver medições fiáveis;
- Não conseguem medir a interface entre dois líquidos que não se misturam como a água e o óleo;
- Custo elevado: o custo aumenta com o aumento da precisão.

### ***3.3 Geofones e sismógrafos***

Uma das características associadas às aluviões é o ruído que estas provocam e as vibrações que induzem ao solo. Estas vibrações, geradas através da colisão de pedregulhos ou entre a colisão do material rochoso com o leito do canal por onde este circula, podem ser medidas através de acelerómetros (Figura 5A), geofones (Figura 5B) ou sensores acústicos.

Os geofones são equipamentos que detetam ondas sísmicas, sendo colocados, normalmente, à superfície do terreno ou enterrados, e convertem a energia sísmica em tensão elétrica, sendo a tensão elétrica proporcional à velocidade de oscilação do solo. São o tipo de sensores mais comumente utilizados para a monitorização de aluviões de acordo com (Abancó, Hürlimann, Fritschi, Graf, & Moya, 2012) e (Arattano & Moia, 1999), funcionando maioritariamente como ativadores de outros sensores de monitorização ou como método de deteção do fenómeno em sistemas de alarme. Conseguem detetar vibrações provenientes de diversas fontes, entre as quais fluxos de detritos (Abancó, Hürlimann, Fritschi, Graf, & Moya, 2012), terremotos próximos aos geofones, trovoadas, vento em árvores e tráfego humano e motorizado (United States Geological Survey). Podem fazer leituras que, uma vez analisadas, conseguem localizar o início do movimento bem como prever a sua direção (Kunnath, Ramesh, & Selvan, 2010).



Figura 5 – Sensores de vibração do Sistema MonitorizaRibeiras: Acelerómetro (A) e Geofone (B).

Os acelerómetros, assim como os geofones, detetam as vibrações do solo, mas a diferença reside no intervalo de frequências que cada aparelho consegue detetar: 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, Hürlimann, Fritschi, Graf, & Moya, 2012).

Como referido anteriormente, os geofones são utilizados normalmente como sensores que ativam outros equipamentos de monitorização, sendo por isso necessária a definição de valores limites de vibração que, ao serem ultrapassados sejam interpretados como o início de uma aluvião. Para este efeito é utilizado um algoritmo que verifica as variações do sinal do geofone que possam indicar a ocorrência de um evento (Kogelnig et al. 2011). Assim, é comum existirem duas frequências de registo: uma frequência mais baixa, utilizada para o “modo normal”, ou seja, quando não há registo de ocorrência de uma aluvião, e uma outra frequência, mais alta, para o “modo de evento”.

Geralmente os valores limites são estabelecidos com base em análises empíricas, através da experiência de técnicos e investigadores, como também são definidos para cada geofone, dependendo do local onde estão colocados. No entanto, a definição destes limites ainda é um assunto que deixa muitas questões em aberto, pois são poucos os estudos feitos relativos à influência que o local induz sobre a vibração causada pelas aluviões (Abancó, Hürlimann, & Moya, 2014).

A definição dos valores limites é essencial para a deteção das aluviões. Estes devem ser definidos de maneira a que as vibrações induzidas pelo ruído, como a passagem de veículos,

sejam ignoradas e as vibrações provocadas pela passagem da aluvião sejam preservadas. De maneira a satisfazer estas duas condições, a definição dos valores limites deve ser realizada em cada ponto de localização do geofone, tendo em conta os fatores que influenciam a colocação dos equipamentos (a distância entre o sensor e o local por onde circula a torrente; características do estrato onde o sensor está colocado e entre a localização do sensor e o canal; e o tipo de montagem do sensor (Abancó, Hürlimann, Fritschi, Graf, & Moya, 2012)).

#### ***Vantagens***

- Robustez;
- Baixo consumo;
- Podem ser instalados a uma certa distância do local a monitorizar, estando protegidos da aluvião;
- Não são necessárias estruturas especiais para serem montados;
- A visibilidade não é um fator preponderante na escolha da localização.

#### ***Desvantagens***

- Baixa capacidade de armazenamento de informação (Abancó, Hürlimann, Fritschi, Graf, & Moya, 2012);
- Custo relativamente elevado;
- Dificuldade na definição dos limites de aviso, pois estes podem ser influenciados devido a outras fontes que não a passagem da aluvião pelo percurso que está a ser monitorizado, entre elas, a passagem de camiões e a queda de pedras;
- Dificuldade na escolha do local ótimo para a colocação do equipamento;
- As vibrações só conseguem ser detetadas a uma distância relativamente pequena à localização do geofone. Isto coloca problemas em sistemas de alerta que estão dependentes da deteção destas vibrações com uma determinada antecedência.

### ***3.4 Udógrafos para monitorização da precipitação***

Uma vez que muitas das aluviões têm na sua origem precipitações intensas (Secretaria Regional do Equipamento Social Região Autónoma da Madeira; Instituto Superior Técnico; Universidade da Madeira; Laboratório Regional de Engenharia Civil, 2010), importa registar e caracterizar os níveis de precipitação e, com base nestes, definir os níveis críticos que poderão originar fluxos de detritos. No entanto, estes níveis críticos são suscetíveis a uma elevada probabilidade de falsos alarmes, pois não são todas as tempestades que ao excederem os níveis originarão uma aluvião (Arattano & Marchi, 2008). Na Madeira, o registo da precipitação é elaborado por três entidades distintas: LREC, Água e Resíduos da Madeira (ARM) e Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA).

A precipitação é definida como o produto líquido ou sólido da condensação de vapor de água que atinge a superfície terrestre. Incluem-se chuva, neve, granizo, orvalho, geada e nevoeiro como variantes da precipitação. O total de precipitação que atinge o solo num determinado período de tempo é expresso em termos de coluna vertical de água que atingiria uma projeção horizontal da superfície terrestre e é registado, normalmente em milímetros (volume/área) para precipitação líquida, e em centímetros para neve.

Os udógrafos são aparelhos que fazem o registo contínuo da precipitação (Figura 6). São utilizados para determinar as horas de começo e fim de precipitação e para determinar a intensidade da chuva em qualquer momento (Orgaz, Teixeira, & Amorim, 1995). Antigamente o registo por parte dos udógrafos era representado em papel e devolvia um udograma, mas esta “tecnologia” tornou-se obsoleta. Atualmente os dados já são digitais e enviados para uma estação de monitorização.



Figura 6 – Udógrafo de alarme do Sistema MonitorizaRibeiras.

A precipitação é definida com base no seu total, na sua duração e na maneira como se distribui no espaço e no tempo, isto é, a quantidade de precipitação só tem significado quando associada a uma duração. A título de exemplo, 100 mm pode representar pouco para um mês da estação húmida, mas já é muito se ocorrer num dia e uma excecionalidade se verificado numa hora. Na Madeira, a 20 de fevereiro de 2010, ocorreu uma

excepcionalidade. Na estação do Areeiro, por exemplo, foram registados 47 mm em 10 min e 140 mm em 1 h (Secretaria Regional do Equipamento Social Região Autónoma da Madeira; Instituto Superior Técnico; Universidade da Madeira; Laboratório Regional de Engenharia Civil, 2010).

### ***Vantagens***

- Baixo custo de manutenção: como não acumulam precipitação não requerem visitas regulares para os esvaziar;
- Medições geralmente exatas, sem grandes desvios em situações de precipitações menos intensas;
- Melhor resolução temporal, em comparação com os udómetros, sendo também possível reduzir as perdas por evaporação.

### ***Desvantagens***

- Durante precipitações intensas, o udógrafo não consegue acompanhar o ritmo devido ao tempo que cada báscula demora a mudar a sua posição, provocando assim uma subestimação da precipitação real;
- A precisão do aparelho pode ficar condicionada à acumulação de pó ou sujidade nas básculas, bem como devido a ninhos de animais;
- Podem ocorrer perdas por evaporação em regiões quentes, tornando este erro significativo com chuva fraca;
- Não é possível determinar com precisão o momento de início e de fim de chuva muito fraca ou chuvisco (Orgaz, Teixeira, & Amorim, 1995);
- Em situações de vento muito forte, este pode entrar por entre as frestas do equipamento e provocar oscilações nas básculas de modo a que estes façam um registo de precipitação erróneo, resultando numa sobrestimação.

## 4 Sistemas de monitorização

Em várias regiões montanhosas do mundo há registos de enxurradas que ameaçam pessoas e infraestruturas com as suas forças destrutivas, pelo que foram criados sistemas de instrumentação e de monitorização como medida de estudo, controlo e mitigação da sua perigosidade, assim como também sistemas de alerta. Enquanto a monitorização visa estudar o comportamento da aluvião, a instrumentação procura detetar a ocorrência destes eventos de maneira a servir de alerta para aqueles expostos ao risco (Abancó, Hürlimann, Fritschi, Graf, & Moya, 2012). Estabelecer um sistema de alerta que possa ser ativado logo nos momentos iniciais de uma aluvião é crucial para a proteção das populações e infraestruturas a jusante.

É com base nestes pressupostos que foi implementado o Sistema MonitorizaRibeiras, descrito posteriormente no Subcapítulo 3.3. São, também, descritos outros locais e respetivos sistemas de monitorização: Taiwan, Torrente de Moscardo, em Itália, Erlenbach, na Suíça e o Rio Arimura, no Japão. Muitos mais locais haveria para descrever, no entanto estes foram selecionados devido aos equipamentos utilizados e devido a algumas particularidades no sistema de monitorização, como a utilização de um sistema móvel, em Taiwan.

### 4.1 Taiwan

#### ***Localização e características da bacia***

Taiwan é uma ilha propensa à ocorrência de aluviões, provocando estas muitas vezes perdas humanas e prejuízos em propriedades. Apesar da ocorrência relativamente comum destes fenómenos, a investigação era escassa, e os dados registados eram poucos, pelo que o Gabinete de Conservação do Solo e da Água, em inglês, Soil and Water Conservation Bureau (SWCB), iniciou o projeto de monitorização.

A ilha de Taiwan está localizada na fronteira entre as Placas Euroasiática e das Filipinas, estando por isso sujeita à ocorrência de sismos com alguma frequência. Uma frente estacionária persistente entre a primavera e o verão e a ocorrência de tufões maioritariamente entre o verão e o outono são os responsáveis pelas fortes precipitações que abalam a ilha, onde a precipitação anual média é superior a 2500 mm.

A ilha apresenta uma área de aproximadamente 36000 km<sup>2</sup>, com montanhas altas e íngremes, a orografia e as elevações são altamente variáveis; as planícies são estreitas e ocupam somente um terço da ilha, sendo que é nestas zonas onde existe maior densidade populacional. Estas condições juntamente com as precipitações intensas e com os sismos tornam a ilha de Taiwan suscetível à ocorrência de aluviões.

**Sistema de monitorização fixo**

Desde 2002 que em Taiwan funciona o projeto de monitorização de aluviões (Yin, et al., 2011). Este é constituído por 22 estações de monitorização fixas, *in situ*, (Figura 7A) e 3 estações móveis (Figura 7B), estabelecidas por vários locais de Taiwan.

As 22 estações de monitorização encontram-se localizadas nas proximidades de locais propensos a aluviões. De acordo com um estudo realizado pelo SWCB existem em Taiwan 1552 potenciais canais onde se podem desenvolver fluxos de detritos.

Em cada estação de monitorização estão presentes como equipamentos para deteção das aluviões: udógrafos, câmaras de vídeo, sensores de fio, geofones e um sensor ultrassónico. Para registar os efeitos do clima existem ainda sensores de medição de humidade e temperatura do ar, anemómetros, cataventos, sensores de medição do teor em água do solo e barómetros.



Figura 7 – Distribuição das 22 estações de monitorização *in situ* em Taiwan (A) e Estação de monitorização móvel (B).

Os dados registados pelos sensores são transmitidos para uma cabine de instrumentação através de cabos ou de um sistema wireless, para um processamento de dados inicial. Após este processamento, os dados são transmitidos via satélite para o SWCB. Caso ocorra alguma falha de transmissão por satélite, existem sistemas *backup* de envio da informação, através de um modem com ligação ADSL ou através da rede de telecomunicações móvel ou

doméstica. A transmissão por satélite foi escolhida como principal sistema de comunicação devido ao clima e à dificuldade de comunicação existente nas zonas montanhosas remotas.

O sistema de monitorização funciona segundo dois modos: o “modo normal” e o “modo de evento”. Durante o “modo normal” a taxa de aquisição de dados por parte dos sensores funciona a baixa frequência. Quando os udógrafos detetam precipitação que ultrapassa os limites definidos (a intensidade de precipitação ultrapassa os 10 mm/h ou a precipitação acumulada excede os 100 mm em 24 horas) o sistema passa a “modo de evento”, e a taxa de aquisição de dados dos sensores é maior. Ao mesmo tempo, o sistema emite automaticamente um sinal para os investigadores do SWCB através de telecomunicações móveis.

### ***Sistema de monitorização móvel***

A maior parte das aluviões em Taiwan acontece durante a época de cheia (maio a novembro), com origem em tufões acompanhados por precipitações intensas. Uma vez que a rota dos tufões é variável, nem sempre os eventos acontecem nos locais que são monitorizados, daí o SWCB ter desenvolvido desde 2004 diversas estações de monitorização móveis, de modo acompanhar a imprevisibilidade do fenómeno.

Quando o Instituto de Meteorologia de Taiwan emite um alerta de tufão, as estações móveis são encaminhadas para os locais com maior probabilidade de ocorrência de aluvião, de acordo com um modelo de previsão da rota dos tufões. Em 2013 existiam três estações de monitorização móveis (Lee & Yin, 2013).

As estações móveis são semelhantes àquelas colocadas *in situ*. Incluem sensores de monitorização, plataforma de instrumentação a bordo, sistema de transmissão e de visualização dos dados. O sistema de monitorização contém um udógrafo, um geofone e duas câmaras de vídeo. A plataforma de instrumentação inclui computadores e dispositivos de alimentação mais leves e instrumentos à prova de choque com dimensões mais reduzidas. A transmissão dos dados é, à semelhança da estação fixa, realizada por satélite.

## **4.2 *Torrente de Moscardo, Itália***

### ***Localização e características da bacia***

A bacia hidrográfica da torrente de Moscardo está localizada nos Alpes Cárnicos, na zona nordeste de Itália, cobrindo uma área de 4.1 km<sup>2</sup>, com uma elevação compreendida entre os 890 e 2043 m e um declive médio de 63 %. A Figura 8 ilustra a delimitação da bacia da Torrente de Moscardo, assim como a zona de iniciação das aluviões e os locais instrumentados.

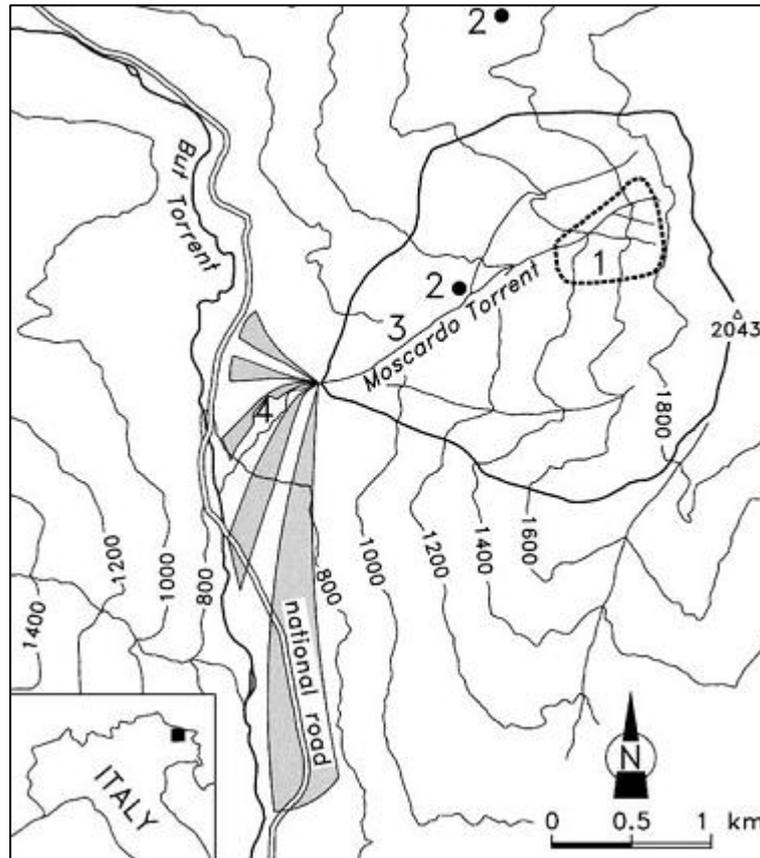


Figura 8 – Torrente de Moscardo. 1: zona de iniciação das aluviões; 2: udómetros; 3 e 4: trechos instrumentados.

### **Sistema de monitorização**

A meados dos anos 80 foi iniciado um projeto de investigação pelo Instituto para a Proteção Hidrológica e Geológica do Conselho Nacional Italiano de Pesquisa de Torino, em inglês, Institute for Hydrological and Geological Protection of the Italian National Research Council (CNR IRPI), cujo objetivo era o dimensionamento e a instalação de um sistema de monitorização num pequeno curso de água nos Alpes Italianos. A zona escolhida foi a Torrente de Moscardo por apresentar uma elevada taxa de fluxos de detritos, anormalmente alta para os Alpes Europeus, mas baixa quando comparada com algumas bacias asiáticas. Em 1989 o local foi equipado para a monitorização de enxurradas.

Esta bacia foi selecionada para monitorização pois, para além de apresentar uma elevada taxa de ocorrência de aluviões, é de fácil acesso e com disponibilidade de energia elétrica e apresenta um canal bem definido, não estando sujeita a grandes modificações ou desvios.

Assim, em 1989 foi instalado o sistema de monitorização composto por dois sensores ultrassónicos e um udógrafo. Os sensores ultrassónicos foram colocados numa zona

intermédia do canal, com uma distância de 300 m entre eles, assentes em estruturas de betão localizadas nas margens do canal. O udógrafo foi colocado a uma elevação de 1520 m, perto do limite da bacia.

Em 1995 o sistema foi complementado com um terceiro sensor ultrassónico, colocado a 150 m a montante dos outros dois existentes, no entanto estes passaram a ser suspensos por cima do canal, deixando de parte as estruturas em betão, pois uma aluvião em 1993 causou um alargamento da seção transversal e provocou um desvio do canal para o lado direito. O problema resultante é que o sensor, que estava assente na margem esquerda, deixou de monitorizar a parte central do canal e a estrutura em que este estava assente não podia ser facilmente modificada.

Para além da introdução de um novo sensor ultrassónico, foi também instalada uma câmara de vídeo no percurso monitorizado pelos sensores ultrassónicos, perto do sensor intermédio, e uma rede de sensores sísmicos (sismómetros e geofones) a cerca de 1 km a montante das estações ultrassónicas. É de salientar que a câmara de vídeo apenas regista quando um *software* deteta mudanças abruptas nos valores registados pelo sensor ultrassónico a montante.

Em 1997, um segundo udógrafo é colocado no centro da bacia e dois novos sensores sísmicos são instalados perto do sensor ultrassónico intermédio (*vide* Figura 9).

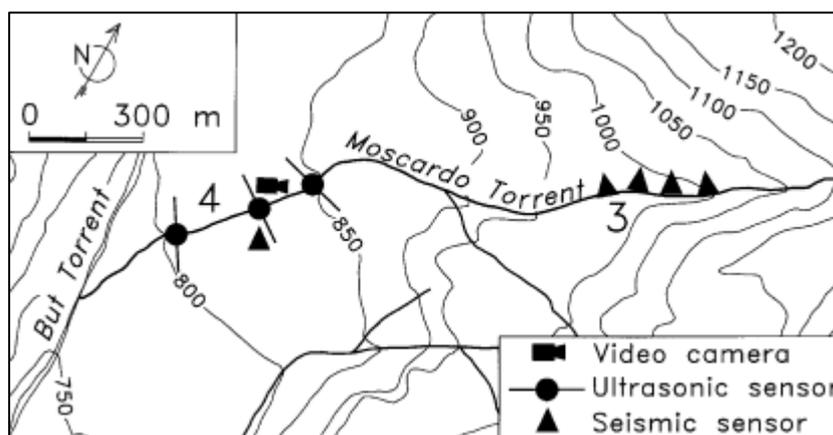


Figura 9 – Localização das seções instrumentadas.

Devido a contenção de custos ao longo dos anos, em 2006 o sistema de monitorização estava equipado com um udógrafo colocado na parte central da bacia; a rede de sensores sísmicos era constituída por dois geofones e um sismómetro, colocados na margem direita do canal, em que a distância entre o primeiro e o segundo sensor era de 88 m e entre o segundo e o terceiro de 155 m. No cone de dejeção estavam colocados dois sensores ultrassónicos, afastados entre si a 75 m, e um geofone colocado 63 m a jusante do segundo sensor ultrassónico (Arattano, Marchi, & Cavalli, 2012).

Ao longo do tempo foram vários os parâmetros medidos e registados pelos equipamentos existentes em Moscardo. Incluem-se entre estes a velocidade média da frente, velocidade superficial, volume, altura da torrente, precipitações que desencadeiam aluviões, entre outros (Arattano, Marchi, & Deganutti, 2002).

Através dos sensores ultrassónicos foi possível determinar a altura da torrente e assim registar os gráficos do perfil de escoamento das aluviões. Inicialmente, o tempo entre duas medições consecutivas era de 60 s, mas devido a atualizações e melhoramentos dos sensores, os registos passaram a ser efetuados de 1 em 1 s. A velocidade média da frente é também calculada com recurso aos ultrassónicos. Através da medição da altura da torrente e de levantamentos topográficos foi possível estimar o pico de descarga e o volume total de fluxo de detritos.

Os sensores sísmicos (geofones e sismómetros) registam as vibrações do solo produzidas pela passagem de uma aluvião. Inicialmente estes foram colocados com o propósito de verificar que informação poderia ser obtida através destes aparelhos com a passagem de uma aluvião, mas os resultados obtidos mostraram a possibilidade de usar estes detetores como equipamentos de medição da velocidade.

A câmara de vídeo permite a interpretação visual das características das aluviões. Esta é acionada pelo sensor ultrassónico a montante, através de um *software* que identifica mudanças bruscas na torrente. A câmara está colocada de maneira a poder filmar obliquamente uma secção do canal com cerca de 80 m. Para além da interpretação visual, foi também possível estimar a velocidade superficial das aluviões. Os resultados obtidos do processamento das imagens mostraram-se consistentes com aqueles obtidos pelos sensores ultrassónicos.

#### **4.3 Sistema MonitorizaRibeiras, Ilha da Madeira**

##### ***Localização e características das bacias***

As bacias hidrográficas em estudo estão localizadas na costa sul da ilha (*vide* Figura 10) e são caracterizadas por um declive médio entre os 28 e os 37 %, havendo áreas com declives superiores a 50 %. A bacia da Ribeira Brava é a de maior dimensão, com uma área de, aproximadamente, 40.9 km<sup>2</sup>, em contraste com a Ribeira de João Gomes, com, aproximadamente, 11.4 km<sup>2</sup>. No Quadro 1 encontram-se identificadas algumas características das bacias, como a área, a altitude máxima e o declive médio, o comprimento do curso de água principal e o tempo de concentração.

**Quadro 1 – Características gerais sobre as bacias em estudo.**

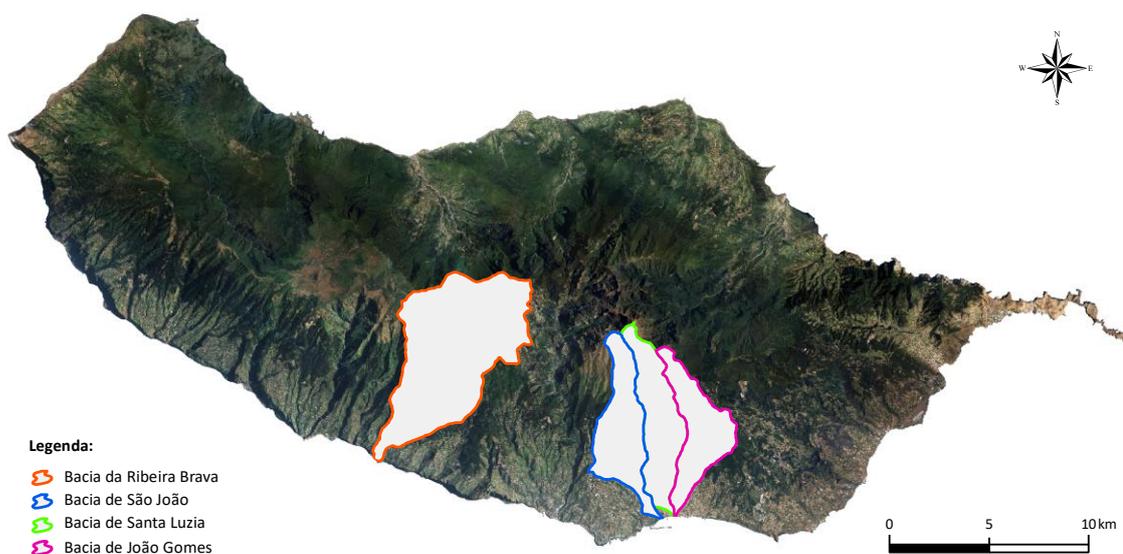
Bacia hidrográfica	Área [km <sup>2</sup> ]	Altitude máxima [m]	Declive médio [%]	Comprimento do curso de água principal [km]	Tempo de concentração [h]
Ribeira de João Gomes	11.4	1595	28	10.2	1.60
Ribeira de Santa Luzia	15.6	1785	29	11.5	1.80
Ribeira de São João	14.7	1763	27	11.5	1.75
Ribeira Brava	40.9	1689	37	13.3	2.25

### **Sistema de monitorização**

O Sistema MonitorizaRibeiras tem como objetivo a conceção de um sistema automático integrado no Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) para a monitorização de algumas das ribeiras afetadas pela mais recente aluvião de 20 de fevereiro de 2010 e que foram alvo do estudo científico na 1ª Fase do EARAM. A monitorização dos cursos de água será efetuada essencialmente através de câmaras de vídeo. Adicionalmente, outros equipamentos serão utilizados, tais como sensores de nível ultrassónicos, sensores de nível com tecnologia de radar e sensores de vibração. Os níveis de precipitação serão igualmente monitorizados, com a montagem de novos udógrafos de alarme, que vêm no âmbito deste projeto reforçar a rede de monitorização já existente.

É, também, objetivo deste projeto tentar estabelecer relações de causa-efeito associadas às diversas variáveis monitorizadas, ou seja, entre os níveis de precipitação (registados pelos udógrafos) e os caudais registados nas ribeiras (câmaras de vídeo e sensores de nível), e entre o volume de material sólido transportado e as vibrações obtidas (registadas pelos geofones).

O presente sistema abrange as bacias hidrográficas de quatro ribeiras da vertente sul da Ilha da Madeira: Ribeira Brava, São João, Santa Luzia e João Gomes (Figura 10) e compreende 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).



**Figura 10 – Âmbito Geográfico do Projeto MonitorizaRibeiras.**

Os udógrafos, através do sistema GSM (*Global System for Mobile Communications*), enviam dados em intervalos de tempo pré-definidos e emitem alarmes automáticos sempre que os limiares de precipitação são atingidos. Por sua vez, as câmaras de vídeo estabelecem comunicação com o LREC através da rede de telecomunicações (Figura 11) criada exclusivamente para este sistema de monitorização.

A comunicação por rádio frequência, entre as secções da ribeira e o LREC, foi conseguida por intermédio de 5 *gateways* (repetidores) estrategicamente posicionados. Esta solução, para além de mais sustentável (sem custos de serviço de telecomunicações), introduz robustez ao sistema, uma vez que é independente das quebras de serviço que, tipicamente acontecem nas telecomunicações durante e após a ocorrência de um evento extremo. Por outro lado, na eventualidade de um nó da rede se danificar, a mesma tem a capacidade de redirecionar o sinal para um outro nó mais próximo. Contudo e ainda assim, houve a necessidade de recorrer à fibra ótica para estabelecer ligação com os pontos de monitorização da Ribeira Brava e com a ponte de João Gomes (GW1).

Finalmente importa referir que, analogamente à solução adotada para os repetidores a montante (GW2, GW3 e GW4), foi estudada a possibilidade de fornecer energia às câmaras situadas na zona dos açudes através de painéis fotovoltaicos, no entanto concluiu-se que a reduzida exposição solar destas zonas não oferecia garantias de um funcionamento contínuo, optando-se pela corrente elétrica fornecida por cabo

Como referido anteriormente a monitorização será predominantemente realizada por intermédio de câmaras de vídeo, distribuídas ao longo do curso principal das quatro bacias hidrográficas que compõem o sistema atualmente desenvolvido, cada uma das quais

dispondo de 8 equipamentos de vigilância, como ilustrado em pormenor na Figura 12 e na Figura 13, respetivamente para os concelhos do Funchal e da Ribeira Brava.

As secções de monitorização foram selecionadas tendo em consideração, no caso das ribeiras do Funchal, a localização dos açudes construídos, pelo objetivo de estudar e analisar o comportamento dos mesmos na retenção de material sólido, considerando-se que o sistema montado constituiria um importante instrumento para uma eventual melhoria e adaptação destas infraestruturas no desempenho das suas funções de retenção (aliás recomendado em Piton et al., 2015).

As fozes das ribeiras de João Gomes e de Santa Luzia, confluídas recentemente, suscitaram interesse no âmbito deste projeto, pela possibilidade de se analisar o comportamento das mesmas aquando da sua união, bem como de concluir se o rebaixamento do leito e aumento do declive do fundo contrariarão a tendência de paragem progressiva do material sólido imediatamente a montante da foz.

As restantes secções foram definidas em função da sua forma e dimensão optando-se, sempre que possível, por secções canalizadas, com vista a medição de velocidades e de caudais. Para além do mais, houve a acrescida preocupação da existência de linha de vista com o LREC, sob pena de atenuação ou perda do sinal recebido.

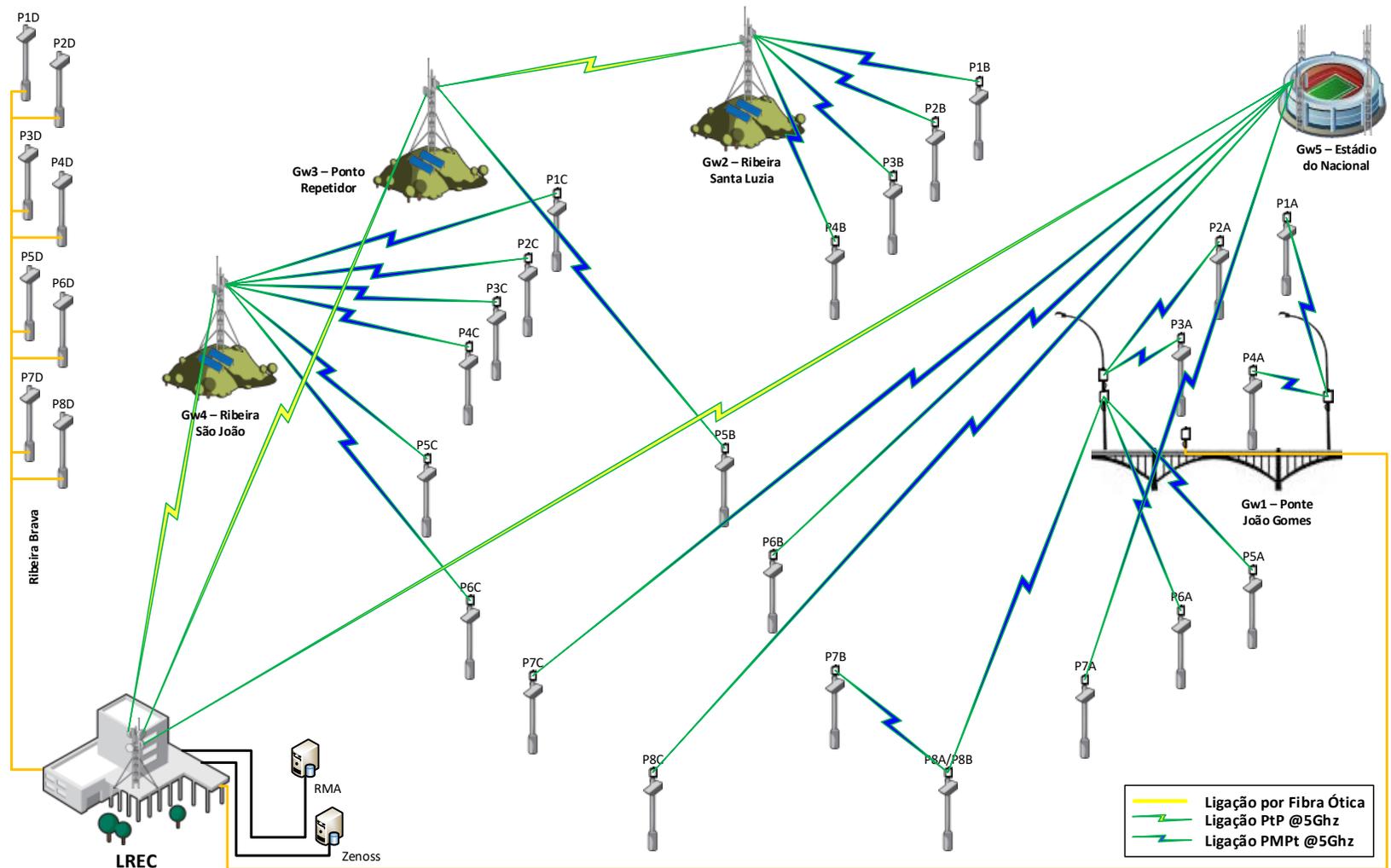


Figura 11 – Representação esquemática da rede de telecomunicações.



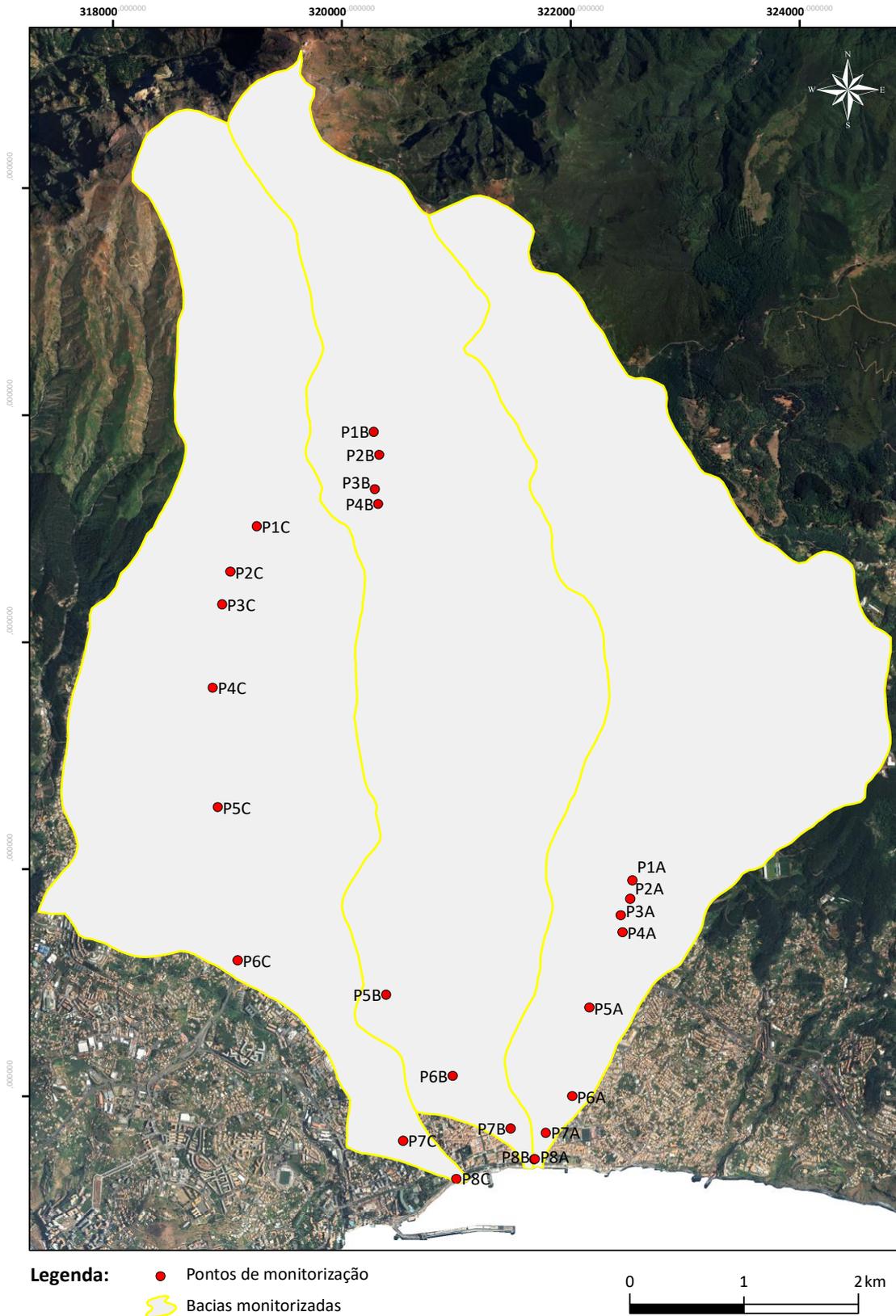
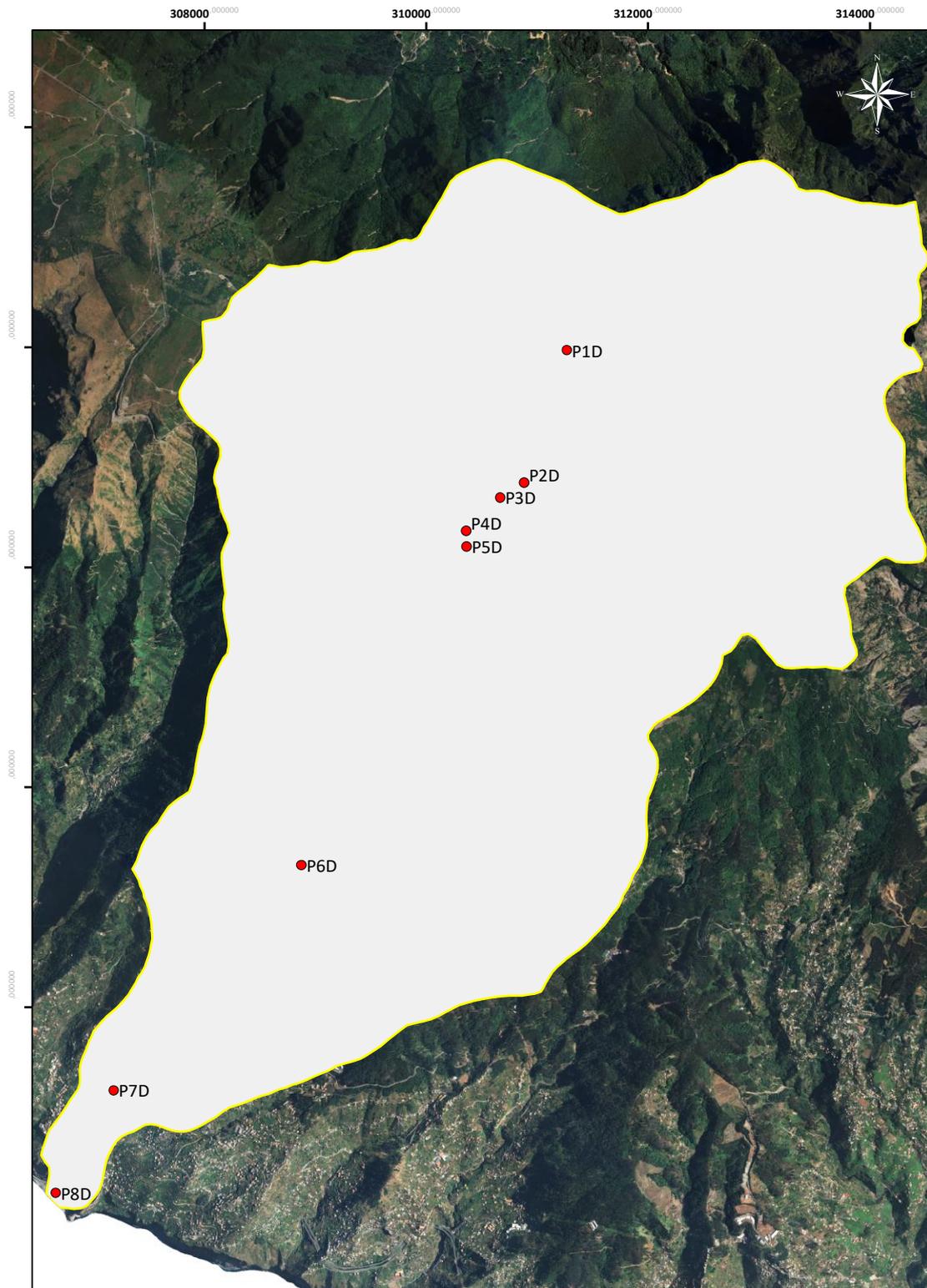


Figura 12 – Identificação das secções monitorizadas no concelho do Funchal.



**Legenda:** ● Pontos de monitorização  
🟡 Bacia monitorizada



**Figura 13 – Identificação das secções monitorizadas no concelho da Ribeira Brava.**

#### 4.4 Erlenbach, Suíça

A bacia hidrográfica de Erlenbach, localizada na Suíça, tem uma área de 0,7 km<sup>2</sup> e uma precipitação média anual de 2300 mm (30 a 40 % da qual cai como neve de novembro a abril). Normalmente, os eventos em Erlenbach ocorrem com o degelo, na primavera, ou com as precipitações intensas de curta duração, no verão. A inclinação do leito é de 18 %, em média, e de 11 % ao longo dos 50 m imediatamente a montante da secção monitorizada.

O transporte de sedimentos no curso de água de Erlenbach tem sido monitorizado há mais de 25 anos. Em 1986 a monitorização era realizada à custa de 9 sensores piezoelétricos instalados em placas de impacto, sendo o respetivo material sólido depositado numa bacia de retenção com capacidade de cerca de 2.000 m<sup>3</sup>. O material retido na bacia é quantificado pelo menos uma vez por ano e sempre que ocorre grandes eventos. Em 1999, os 9 PBIS (Piezoelectric Bedload Impact Sensors) foram substituídos por 6 geofones. Em 2009 foi instalado um sistema automático de *Basket Samplers* (Figura 14).



Figura 14 – Sistema de Basket Samplers (Rickenmann, Turowski, Fritschi, Klaiber, & Ludwig, 2012).

O sistema atualmente implementado consiste numa placa de impacto montada na secção transversal do curso de água e num sistema de *Basket Samplers*, doravante designados de “amostradores”. Este sistema permite a recolha de amostras de material sólido, a partir das quais é possível proceder à calibração dos sensores instalados na placa de impacto. Esta metodologia tem permitido alguns autores correlacionarem a taxa de transporte de sedimentos com o número de picos do sinal (Rickenmann, Turowski, Fritschi, Klaiber, & Ludwig, 2012), com a amplitude (Moen, Bogen, Zuta, Ade, & Esbensen, 2010), ou com a energia do sinal (Esteves, 2014). Além disso, foi colocada uma câmara de vídeo, transversalmente à direção do escoamento, na zona das placas de impacto, para correlacionar o modo de transporte dos sedimentos com o sinal adquirido pelos sensores.

O movimento dos amostradores é despoletado através de um número mínimo de impulsos do geofone. O aumento do peso nos amostradores, devido à acumulação de sedimentos, é

medido por dois sensores de força instalados na estrutura de suporte dos amostradores. Esta informação, combinada com as gravações dos geofones, determina quando é que o amostrador deve movimentar-se para fora do alcance do escoamento. Para além desta função, os sensores de força fornecem a indicação da variação temporal do transporte sólido, durante o período de amostragem.

Este sistema tem possibilitado uma monitorização mais sistemática, comparativamente à que era realizada em 1986, contudo os autores ressalvam o facto de existirem diferentes fatores que podem afetar a resposta do sinal no sistema de monitorização montado.

#### 4.5 Rio Arimura, Japão

O rio Arimura localiza-se na ilha japonesa Sakurajima, sendo esta uma das ilhas de maior atividade vulcânica do Japão. A bacia hidrográfica deste rio apresenta uma área de 1.35 km<sup>2</sup>, uma inclinação do leito de 19 % e cerca de 20.5 m de largura na secção a monitorizar (Osaka, Utsunomiya, Tagata, Itoh, & Mizuyama, 2014). O número de ocorrências de aluviões tem vindo gradualmente a crescer, pelo que foi instalado um sistema de monitorização de forma a obter as variações temporais das alturas de escoamento e do caudal.

O sistema implementado consiste na colocação de células de carga e de sensores de pressão numa secção transversal do curso de água (descarregador) e permite calcular, para além do caudal, a variação ao longo do tempo da concentração de sedimentos finos e grosseiros. O sistema é composto principalmente por (*vide* Figura 15):

- 4 Células de carga;
- Uma placa em aço (2x4x0.032m);
- 2 Sensores de pressão (para medição da pressão intersticial);
- Um sensor ultrassónico e um sensor de velocidade (medição da altura de escoamento e velocidade, respetivamente);
- Câmaras de vídeo;
- Um sismógrafo;
- Um udógrafo e um radar meteorológico.

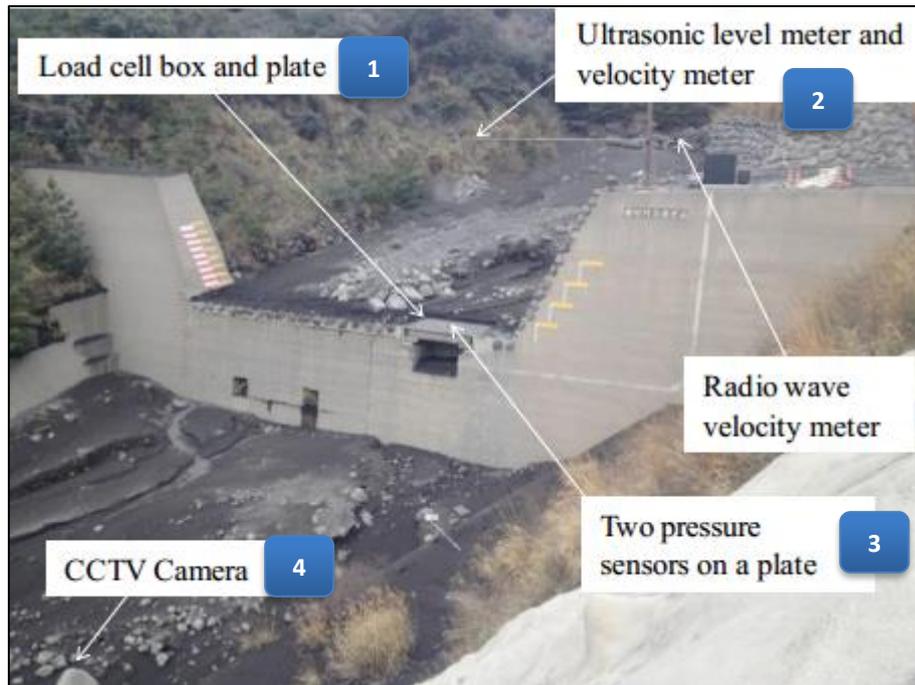


Figura 15 – Sistema de monitorização composto por células de carga e uma placa em aço (1), um sensor ultrassónico e um sensor de velocidade (2), sensores de pressão (3) e uma câmara de vídeo (4) (Osaka, Utsunomiya, Tagata, Itoh, & Mizuyama, 2014).

OSAKA e outros (Osaka, Utsunomiya, Tagata, Itoh, & Mizuyama, 2014) apresentam um esquema de forma a estimar a concentração de sedimentos numa aluvião:

1. Medição da tensão normal através das células de carga;
2. Altura e largura do escoamento e velocidade superficial são obtidas através dos sensores de nível ou da análise das imagens das câmaras, enquanto o escoamento/caudal é calculado pela largura e altura do escoamento (área) e velocidade;
3. A concentração de finos é estimada pela diferença de pressão no leito entre água sem presença de sedimentos e a aluvião;
4. A densidade da massa da aluvião é obtida através do rácio entra a tensão normal e a altura do escoamento;
5. A concentração de sedimentos grosseiros é calculada através da diferença entre os pontos 3 e 4.

## 5 Conclusões

O trabalho apresentado satisfaz genericamente todos os objetivos estabelecidos no que respeita à descrição detalhada dos sensores maioritariamente utilizados em sistemas de monitorização de aluviões, expondo inclusivamente as vantagens e desvantagens dos mesmos e, à exposição de variados sistemas de monitorização, entre os quais o MonitorizaRibeiras.

O Sistema recentemente implementado na Ilha da Madeira seguiu a metodologia adotada, por exemplo, em Taiwan e Itália. Os sistemas adotados na Suíça e no Japão são apresentados apenas na perspetiva de sugestão/proposta para uma bacia/secção piloto, pois tratam-se de sistemas específicos para a determinação da quantidade de material sólido, que carecem ainda de investigação, razão pela qual aquando da adoção destas técnicas (placas de impacto e células de carga) deve estar prevista a realização de experiências laboratoriais.

Da pesquisa bibliográfica realizada resulta que, em geral, um único equipamento não fornece as medições necessárias para a determinação do caudal líquido e do transporte sólido, sendo portanto necessário combinar diferentes equipamentos, através de diversas técnicas, em função do objetivo do estudo, do tipo de curso de água, da duração da medição, do orçamento disponível, etc.

O Sistema MonitorizaRibeiras dispõe dos equipamentos e sensores sugeridos pela generalidade dos artigos científicos internacionais que abordam a temática em causa, os quais constituem uma ferramenta para a monitorização do caudal líquido e do transporte sólido.

## 6 Referências bibliográficas

- Abancó, C., Hürlimann, M., & Moya, J. (2014). Analysis of the ground vibration generated by debris flows and other torrential processes at the Rebaixader monitoring site (Central Pyrenees, Spain). *Natural Hazards and Earth System Science*, 14(4), 929-943.
- 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., & Grattoni, P. (2000). Using a fixed video camera to measure debris-flow surface velocity. *Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment* (pp. 273-281). Balkema, Roterdão: Wieczorek & Naeser.
- Arattano, M., & Marchi, L. (2000). Video-derived velocity distribution along a debris flow surge. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 781-784.
- Arattano, M., & Marchi, L. (2008). Systems and sensors for debris-flow monitoring and warning. *Sensors*, 2436-2452.
- Arattano, M., & Moia, F. (1999). Monitoring the propagation of a debris flow along a torrent. *Hydrological Sciences Journal*, 44(5), 811-823.
- Arattano, M., Marchi, L., & Cavalli, M. (2012). Analysis of debris-flow recordings in an instrumented basin: confirmations and new findings. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 679-686.
- Arattano, M., Marchi, L., & Deganutti, A. (2002). Data acquisition and processing in a small debris flow prone catchment. *ERB and Northern European FRIENDProject 5 Conference*. Eslováquia.
- Esteves, C. (2014). *Measuring bedload sediment transport with passive acoustic sensors*. Aveiro, Portugal: M. Sc. Thesis, University of Aveiro.
- Graf, C., & McArdeU, B. W. (2009). Debris-flow monitoring and debris-flow runout modelling before and after construction of mitigation measures: an example from an instable zone in the Southern Swiss Alps. *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie*, pp. 243-258.
- 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>
- Itakura, Y., Inaba, H., & Sawada, T. (2005). A debris-flow monitoring devices and methods bibliography. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5(6), 971-977.
- Kogelnig, A., Hübl, J., Suriñach, E., Vilajosana, I., and McArdeU, B. (2011) Infrasound produced by debris flow: propagation and frequency content evolution. *Nat. Hazards*, 70, 1–21,doi:10.1007/s11069-011-9741-8

Kunnath, A. T., Ramesh, M. V., & Selvan, V. (2010). Signal Processing for Wireless Geophone Network to Detect Landslides. *International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics*, (pp. 69-73). Kuala Lumpur.

Lee, C.-Y., & Yin, H.-Y. (2013). Debris Flow Disaster Management in Taiwan. Challenges from Historic Events. *2013 APEC Typhoon Symposium*. Taipé.

Moen, K., Bogen, J., Zuta, J., Ade, P., & Esbensen, K. (2010). Bedload measurement in rivers using passive acoustic sensors. *U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5091*, 336-351.

Orgaz, M., Teixeira, M., & Amorim, V. (1995). *Instrumentação e Métodos de Observação. Curso de Física da Atmosfera*. Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

Osaka, T., Utsunomiya, R., Tagata, S., Itoh, T., & Mizuyama, T. (2014). Debris Flow Monitoring using Load Cells in Sakurajima Island. *Interpraevent 2014*. Japão.

Piton, G. and Recking, A. (2015). "Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes." *J. Hydraul. Eng.* , [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001048](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001048)

Procesl, ProSistemas, Prima. (2003). *Plano Regional da Água da Madeira - Relatório Técnico*. Funchal, Madeira.

Rickenmann, D., Turowski, J., Fritschi, B., Klaiber, A., & Ludwig, A. (2012). Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers. *Earth Surface Processes and Landforms*.

Secretaria Regional do Equipamento Social Região Autónoma da Madeira; Instituto Superior Técnico; Universidade da Madeira; Laboratório Regional de Engenharia Civil. (2010). *Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira - Relatório Base*. Funchal.

Stevens Water Monitoring Systems. (s.d.). *Product Catalog & Resource Guide*. Obtido em 15 de agosto de 2015, de [www.stevenswater.com/resource\\_guide/files/assets/downloads/publication.pdf](http://www.stevenswater.com/resource_guide/files/assets/downloads/publication.pdf)

United States Geological Survey. (s.d.). *Landslide Hazards Program*. Obtido em 15 de agosto de 2015, de Geophone: <http://landslides.usgs.gov/monitoring/hwy50/rtd/geophone.php>

Yin, H.-Y., Huang, C.-J., Chen, C.-Y., Fang, Y.-M., Lee, B.-J., & Chou, T.-Y. (2011). The present development of debris flow monitoring technology in Taiwan - A case study presentation. *5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, (pp. 623-631). Padua, Itália.

Zhang Z., Wang X., Fan T. and Xu L. (2013). River surface target enhancement and background suppression for unseeded LSPIV. *Flow Measurement and Instrumentation*, 30, 99-111, doi:10.1016/j.flowmeasinst.2012.12.002