

Sistemas de Informação Geográfica na monitorização da erosão e sedimentação no Parque Natural da Serra da Estrela

Desenvolvimento de equipamento autónomo e metodologia para monitorização de albufeiras

Versão final após defesa

Paulo Alexandre de Moura Fernandes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Sistemas de Informação Geográfica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Gabriel de Almeida

janeiro de 2023

Folha em branco

Declaração de Integridade

Eu, Paulo Alexandre de Moura Fernandes, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M7669 do Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 13 / 01 / 2023

(assinatura conforme Cartão de Cidadão ou preferencialmente
assinatura digital no documento original se naquele mesmo formato)

Folha em branco

Agradecimentos

Dedico um agradecimento especial ao Professor Martin Höck pela dedicação em seguir este projeto, pelo apoio técnico e pelo equipamento essencial doado para a execução e sucesso desta dissertação.

Um agradecimento também ao Professor Doutor Pedro Almeida como orientador desta dissertação pelo tempo e apoio despendido na execução deste projeto.

Folha em branco

Resumo

Estruturas como albufeiras de barragens e diques existentes em águas interiores afetam o curso natural e fluxo da água causando assim alterações físicas no ambiente onde são construídos, alterações estas provocadas pela acumulação de grandes volumes de água por longos períodos de tempo podem provocar a instabilidade das encostas colocando assim em causa a segurança estrutural da barragem e por consequência das populações e equipamentos a jusante da barragem, bem como das encostas adjacentes às albufeiras. A acumulação de detritos nos fundos dos corpos de água vai também afetar o normal fluxo de águas causando alterações nas correntes. Utilizando sistemas de informação geográfica é feita uma análise da erosão potencial e deposição de sedimentos nas encostas da Serra da Estrela para localizar potenciais locais de acumulação de sedimentos em corpos de água e erosão das encostas para posteriormente realizar um estudo das alterações físicas numa albufeira utilizando medições batimétricas com recurso a veículo não tripulado de modo a identificar potenciais riscos na estabilidade das encostas e outras estruturas submersas.

Nos últimos anos tem-se verificado uma aceleração da perda dos solos em algumas regiões, muito por consequência das alterações climáticas e pelos incêndios registados cada vez com mais severidade e com mais frequência nas mesmas zonas, não permitindo assim uma regeneração natural da vegetação que impediria parte dos fenómenos de erosão. Foi possível realizar uma predição de zonas com potencial erosivo, e em zonas onde não foi possível fazer uma análise geral como são as zonas submersas, a recolha de dados pode ser complementada com recurso a veículos não tripulados.

Foi realizada a análise de perda dos solos no PNSE tendo sido identificadas as zonas de maior suscetibilidade, por análise multicritério em ambiente SIG. Foram ainda desenvolvidos uma metodologia e um protótipo de um veículo aquático não tripulado automatizado que permite a recolha de informação morfológica subaquática em albufeiras, complementando a informação subaérea. A integração desta informação poderá auxiliar na determinação da variação da capacidade útil de albufeiras. Esta informação é determinante na definição de políticas estratégicas de utilização de recursos hídricos, tendo em particular atenção as alterações climáticas.

Palavras-chave

SIG; erosão; barragens; encostas; monitorização; instabilidade; batimetria; topografia

Folha em branco

Abstract

Structures such as dam reservoirs and existing dikes in inland waters affect the natural course and flow of water, thus causing physical changes in the environment where they are built. The changes caused by the accumulation of large volumes of water for long periods of time can cause slope instability, thus jeopardizing the structural safety of the dam and, consequently, the populations and equipment downstream of the dam, as well as the slopes adjacent to the reservoirs. The accumulation of debris at the bottom of bodies of water will also affect the normal flow of water causing changes in currents. Using geographic information systems, an analysis of potential erosion and deposition of sediments on the slopes of Serra da Estrela is carried out to locate potential sites of accumulation of sediments in bodies of water and erosion of slopes to later carry out a study of the physical changes in a reservoir by bathymetric measurements using an unmanned vehicle in order to identify potential risks to the stability of slopes and other submerged structures.

In recent years, there has been an acceleration of soil loss in some regions, largely as a result of climate change and fires that have been increasingly severe and more frequently recorded in the same areas, thus not allowing a natural regeneration of vegetation that would prevent part of the erosion phenomena. It was possible to predict areas with erosive potential, and in areas where it was not possible to make a general analysis such as submerged areas, data collection can be complemented using unmanned vehicles.

A soil loss analysis was carried out in the PNSE and the areas of greatest susceptibility were identified by multicriteria analysis in a GIS environment. A methodology and a prototype of an automated unmanned water vehicle were also developed that allows the collection of underwater morphological information in reservoirs, complementing the subaerial information. The integration of this information may help to determine the variation in the useful capacity of reservoirs. This information is crucial in defining strategic policies for the use of water resources, particularly considering climate change.

Keywords

GIS; erosion; dams; slopes; monitoring; instability; bathymetry; topography;

Folha em branco

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 EROÇÃO	5
2.1.1 - <i>Degradação dos solos</i>	5
2.2 QUANTIFICAÇÃO DE PERDA DE SOLOS	10
2.2.1 - <i>Equação universal de Perda de Solos (EUPS)</i>	11
2.3 ESTABILIDADE DE VERTENTES.....	19
2.3.1 - <i>Mecânica dos solos</i>	21
2.3.2 - <i>Suscetibilidade a eventos destrutivos</i>	21
2.3.3 - <i>Acidentes</i>	23
2.3.4 - <i>Tsunamis originados por movimentos de massas</i>	23
2.4 BARRAGENS.....	24
2.4.1 - <i>Grandes barragens: vulnerabilidades e riscos</i>	26
2.4.2 - <i>Ruturas em barragens</i>	26
2.4.3 - <i>Acidentes em barragem</i>	27
2.4.4 - <i>O que pode inviabilizar uma barragem</i>	32
2.5 DETEÇÃO E MONITORIZAÇÃO DE INSTABILIDADES.....	34
2.5.1 - <i>Instabilidades Emersas</i>	35
2.5.2 - <i>Instabilidades Imersas</i>	37
2.6 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E CARTOGRAFIA DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSAS.....	49
3. DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO INTEGRADO DE MONITORIZAÇÃO E AVISO.....	53

3.1	DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA EM AMBIENTE SIG	54
3.2	DESENVOLVIMENTO DO VEÍCULO AUTÓNOMO DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	56
4.	CASO DE ESTUDO.....	62
4.1	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SIG	62
4.1.1	<i>Fatores para determinação da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS)</i>	65
4.2	DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE VEÍCULO NÃO TRIPULADO	69
4.2.1	<i>Conceção do Protótipo</i>	69
4.3	RESULTADOS E ANÁLISE.....	75
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	80
6.	ANEXOS	82
6.1	LEGENDA DA CARTA COS 2010	82
7.	BIBLIOGRAFIA.....	84

Folha em branco

Lista de Figuras

Figura 1: Curso de água com assoreamento	1
Figura 2: Sedimentação em albufeira de barragem (Foto: J. Stamm/K. Oberhasli) (Prof. Robert Boes, 2016)	2
Figura 3: EUPS2015 elaborado pela Comissão Europeia (Panagos et al., 2015)	3
Figura 4: Barragem assoreada (Robert Boes, 2016)	4
Figura 5: Erosão laminar num campo de trigo em Portugal, perto de Mértola. Notar a cor barrenta da água, o que indica que as partículas de argila se dispersaram. (Imeson & Curfs, 2008)	7
Figura 6: Erosão por sulcos como consequência da agricultura. A escorrência e erosão ocorrem por causa da compactação e enfraquecimento do solo em profundidade. (Imeson & Curfs, 2008)	8
Figura 7: Erosão em barrancos criando uma organização, dendrítica do escoamento. (Imeson & Curfs, 2008)	8
Figura 8: Relação entre a velocidade de fluxo e o tamanho das partículas (Hjulström & Flodkvist, 1936)	10
Figura 9: Fatores que afetam a erosão hídrica do solo (Ferreira 2008)	13
Figura 10: Sequência metodológica do modelo EUPS (CNT, 2015)	13
Figura 11: Representação COS 2010	18
Figura 12: Representação esquemática da evolução de um deslizamento subaquático (National Oceanography Centre, 2018)	20
Figura 13: Zona de Influência e instrumentação implantada (Marendić et al., 2017)	23
Figura 14: Vista aérea da Albufeira da Barragem da Aguieira (Foto de Penacovactual.pt 2019/05/26)	25
Figura 15: Cidade de Johnstown antes da rotura da barragem (History.com, 2009)	27
Figura 16: Cidade de Johnstown após a passagem da onda de cheia. (History.com, 2009)	28

Figura 17: Barragem de St. Francis vista frontal da barragem (Bressan, 2010)	28
Figura 18: Barragem de St. Francis restos da barragem após o acidente. (Bressan, 2010)	29
Figura 19: Local da barragem de Malpasset posteriormente ao acidente (Paris Match 2019).....	30
Figura 20: Barragem de Vajont vista antes do acidente (Dave Petly, 2013).....	31
Figura 21: Barragem de Vajont após o deslizamento da encosta.	31
Figura 22: Albufeira de barragem in Aurland Municipally Norway (Tessema et al., 2019)	32
Figura 23: As três fases das ondas geradas por deslizamentos de terra com os parâmetros relevantes para este estudo: (1) impacto da massa de terra e rochas com a geração de ondas; (2) propagação de ondas com transformação de ondas; e (3) aceleração da onda de impulso e galgamento da barragem (Tessema et al., 2019).	33
Figura 24: Esquema de movimento de massas no interior de um reservatório (Weather Wiz Kids, 2021)	33
Figura 25: Aspeto geral do impacto do deslizamento num reservatório: 1 é a zona de impacto do deslizamento, 2 é a zona de propagação de ondas e 3 a zona de subida da onda pela barragem (a) escorregamento do lado de um desfiladeiro; (b) onda solitária.	34
Figura 26: Levantamento topográfico com tecnologia LIDAR em avião (Shih et al., 2008).....	36
Figura 27: Fotogrametria e Laser Scanning com recurso a VANT(Wingtra, 2021)	36
Figura 28: Fator da distribuição espacial da cobertura do solo.	37
Figura 29: Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa em campanha de levantamento batimétrico.....	40
Figura 30: Deslizamento de terras para o interior da albufeira da barragem (Wernly et al., 2016)	41
Figura 31: Plano batimétrico para a albufeira (Wernly et al., 2016)	42
Figura 32: Modelo batimétrico em 2015 (Wernly et al., 2016).....	42
Figura 33: Modelo batimétrico em 1938 (Wernly et al., 2016).....	43
Figura 34: Comparação do levantamento batimétrico e da capacidade de armazenamento em 1938 e 2015 (Wernly et al., 2016)	43

Figura 35: Levantamento batimétrico do Canal na Barra (Porto de Setúbal - APSS, 2002).....	45
Figura 36: Fundos dos Canais Norte e Sul (Porto de Setúbal - APSS, 2002).....	45
Figura 37: Bacia de Rotação das Pirites (Porto de Setúbal - APSS, 2002)	46
Figura 38: FoxBathy ((Geotresnak, 2019))	47
Figura 39:Hydrographic Unmanned Surface Vehicle ME120 (Oceanalpha, 2019)	47
Figura 40:Drone Catarob (Subsea-tech, 2019)	48
Figura 41: CYBERJET 250 (Tecdron, 2019).....	48
Figura 42: Petróglypho de Bedólina (Petróglypho de Bedólina, 2015)	50
Figura 43: Navegação do veículo.....	57
Figura 44: Erro entre a localização do ponto medido e o ponto nadiral devido ao posicionamento do veículo.....	57
Figura 45: Eixos espaciais do veículo segundo as três direções	58
Figura 46: Sistema de eixos do veículo	58
Figura 47: Quadricula UTM do sistema de coordenadas WGS84. (Droneng, 2017)	59
Figura 48: Esquema do posicionamento corrigido do veículo	60
Figura 49: Cálculo das translações por relações trigonométricas	61
Figura 50: Metodologia para o cálculo do Modelo Digital de Elevação (MDE) em cada época de observação	61
Figura 51: Carta de Perda de Solo Específico	63
Figura 52: Fator de segurança de deslizamentos de massas em função da inclinação. Gerada em SAGA.....	64
Figura 53: Representação do Fator R	66
Figura 54: Representação Fator K	66
Figura 55: Representação do Declive.....	67

Figura 56: Representação Fator LS.....	67
Figura 57: Representação COS 2010 e respetiva legenda.....	68
Figura 58: Representação Fator C.....	68
Figura 59: Esquema inicial de montagem do veículo.....	69
Figura 60: Modelo 3D do Catamaran (Michael, 2015)	70
Figura 61: Esquema de funcionamento do sistema.....	71
Figura 62: Arquitetura do Sistema.....	73
Figura 63: Protótipo do veículo não tripulado	74
Figura 64: Elementos de navegação do protótipo de veículo não tripulado.....	75
Figura 65: Representação da EUPS.....	76
Figura 66: Modelo Digital de Superfície com curvas de nível	77
Figura 67: Mapa de profundidades	77
Figura 68: Modelo digital de superfície com representação do percurso do veículo não tripulado.	78
Figura 69: Equipamento em operação com medição contínua com recurso a estação total	79
Figura 70: Diferenças de cota com o valor médio.	79

Folha em branco

Lista de Tabelas

Tabela 1: Especificações dos Veículos	49
Tabela 2: Coeficiente dependente do declive para cálculo do fator topográfico.....	15
Tabela 3: Classes de uso do solo LandCover - CORINE e respetivo valor de C e K.....	16
Tabela 4: Informação estatística dos resultados	76

Folha em branco

Lista de Acrónimos

AEREHS	Áreas de Elevado Risco de Erosão Hídrica do Solo
CNT	Comissão Nacional do Território
COS	Carta de Ocupação dos Solos
EUA	Estados Unida da América
EUPS	Equação Universal de Perda do Solo
GNSS	Global Navigation Satellite System
GRP	Gabinete de Relações Públicas
IMU	Inertial Measurement Unit
INAG	Instituto Nacional da Água
InSar	Interferometric synthetic aperture radar
LIDAR	Light Detection And Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
PNSE	Parque Natural da Serra da Estrela
PSE	Perda de Solo Específico
RCM	Resolução do Conselho de Ministros
REN	Reserva Ecológica Nacional
REN	Reserva Ecológica Nacional
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
SDR	Razão de Cedência dos Cedimentos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SNIG	Sistema Nacional de Informação Geográfica
UBI	Universidade da Beira Interior
USGS	United States Geological Survey
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

Folha em branco

1. Introdução

Os lagos artificiais como o caso de albufeiras de barragens e diques existentes em águas interiores são estruturas que afetam o curso natural e fluxo da água causando assim alterações físicas no ambiente onde são construídos. Estas alterações provocadas pela acumulação de grandes volumes de água por longos períodos de tempo podem provocar a instabilidade das encostas adjacentes colocando assim em causa a segurança estrutural da barragem e por consequência das populações e equipamentos a jusante da barragem, bem como das encostas adjacentes às albufeiras. A acumulação de detritos nos fundos dos corpos de água vai também afetar o normal fluxo de águas causando alterações nas correntes (figura 1), e alterando significativamente o volume de água útil da albufeira, sendo necessário conhecer com algum rigor a quantidade de sedimentação bem como a sua velocidade e também qual a origem dos sedimentos que provocam o assoreamento uma vez que dentro da bacia hidrográfica poderão ocorrer alterações de origem natural (catástrofes naturais, ciclo hidrológico, entre outros) ou pela ocorrência de obras a montante da albufeira. Em casos de estruturas submersas é importante saber a sua integridade física e estrutural uma vez que a sua alteração poderá levar a falhas dos órgãos de segurança da estrutura das barragens.



Figura 1: Curso de água com assoreamento

As inspeções e monitorizações a zonas submersas contam, hoje em dia, com tecnologia de elevada qualidade e precisão que permite um estudo muito completo dos fundos aquáticos. Estas tecnologias obrigam, no entanto, a uma logística muito complexa uma vez que obriga ao transporte de equipamentos de grandes dimensões e extremamente pesados sendo que se revelam ser um problema em zonas de fundos baixos uma vez que são zonas não navegáveis. Outras alternativas obrigam a recorrer a mergulhadores por períodos de tempos por vezes elevados e obrigando a um grande número de recursos

humanos e a uma logística de materiais e equipamentos igualmente grande o que acarreta em alguns casos custos incontroláveis.

O trabalho proposto tem como objetivo vir a permitir a previsão e deteção atempada em tempo quase real de zonas de risco elevado de deslizamentos de terras em encostas ocupadas por albufeiras de barragens ou outros corpos de água, permitindo um conhecimento mais profundo da perigosidade de movimentos de massas bem como zonas de erosão e assoreamento em áreas submersas (figura 2), onde está representada a sedimentação no interior de uma albufeira vazia, e que a estabilidade das encostas pode ser comprometida.

Para concretizar este objetivo foi construída uma base de dados geográfica que permite produzir mapas das áreas de elevado risco de erosão hídrica do solo que posteriormente cruzada com outra cartografia é possível determinar as encostas potencialmente instáveis ou de elevada erosão.



Figura 2: Sedimentação em albufeira de barragem (Foto: J. Stamm/K. Oberhasli) (Prof. Robert Boes, 2016)

No caso de estudo foi feita uma análise da erosão potencial e deposição de sedimentos nas encostas da Serra da Estrela em ambiente SIG para localizar potenciais locais de acumulação de sedimentos em corpos de água e erosão das encostas para posteriormente realizar um estudo das alterações físicas numa albufeira de uma barragem utilizando medições batimétricas com recurso a veículo não tripulado, desenvolvido internamente para o efeito, de modo a identificar potenciais riscos na estabilidade das encostas e outras estruturas submersas.

Os potenciais locais suscetíveis à erosão que, posteriormente complementados com simulações de fluxos de água superficial e transporte de sedimentos resultantes de períodos de chuva permitiram a determinação dos locais de deposição e perda de solo mais prováveis. Através da utilização da Equação

Universal de Perda do Solo (EUPS) pode estender-se a grandes áreas e permite uma avaliação abrangente da suscetibilidade de regiões à perda de solo (figura 3).

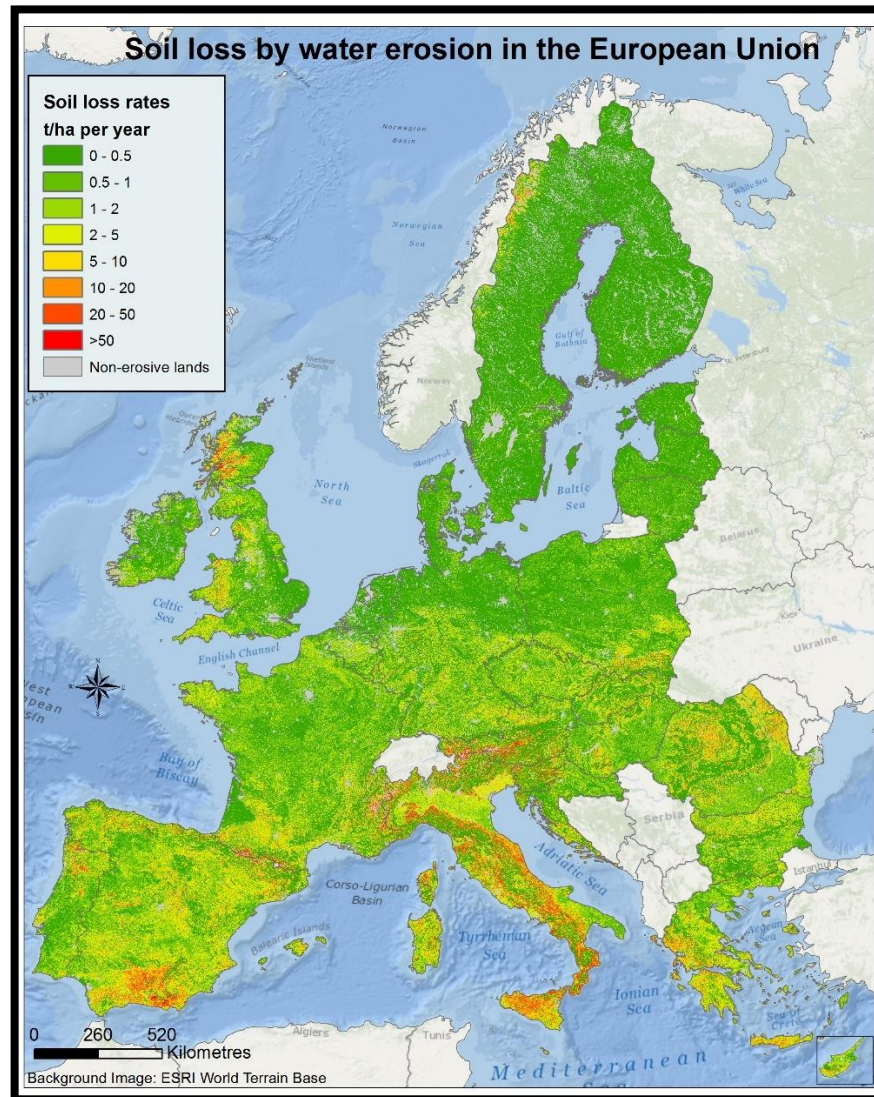


Figura 3: EUPS2015 elaborado pela Comissão Europeia (Panagos et al., 2015)

Foi desenvolvido o conceito para um sistema de aviso em tempo quase real utilizando um equipamento de aquisição de dados batimétricos não tripulado e com recurso a informação geoespacial geológica, geotécnica, topográfica e ambiental, utilizando sistemas GNSS de baixo custo e equipamentos robóticos clássicos. Com este trabalho pretendeu-se construir uma metodologia de avaliação de riscos em corpos de água e uma análise da viabilidade dos dados recolhidos a partir do veículo de forma a tornar esta possibilidade uma alternativa às técnicas de hidrografia para levantamentos batimétricos mais dispendiosas, onde as tolerâncias permitidas sejam centimétricas e posterior análise em ambiente SIG de forma a monitorizar a evolução das ocorrências nos fundos aquáticos e efetuar a deteção atempada de possíveis riscos e assim agir de forma a adotar ações no sentido da sua mitigação de forma a que não

se permita chegar a um momento em que toda a albufeira está de tal forma assoreada, que inutiliza a barragem para os efeitos para a qual foi construída (figura 4).



Figura 4: Barragem assoreada (Robert Boes, 2016)

Esta dissertação foi organizada por capítulos por forma a tornar a sua leitura mais fluida e compreensível, onde no capítulo 2 se descreve a recolha de informação relativamente aos problemas de erosão, assoreamento e estabilidade de barragens de diferentes tipos, assim como das técnicas de levantamento batimétricos e equipamentos de utilização nesses trabalhos. Descrevem-se ainda os equipamentos de navegação autónoma existentes no mercado que apresentam melhores perspetivas de aplicação a este tipo de trabalho. No capítulo 3 é detalhado o desenvolvimento de um método que permite a deteção de zonas com potencial perda de solo utilizando sistemas de informação geográfica e recorrendo a veículos autónomos não tripulados para efetuarem o levantamento de zonas submersas e por isso não visíveis a partir da superfície que posteriormente no capítulo 4 se detalha a forma como toda a informação proveniente de diferentes fontes pode ser integrada em sistemas de informação geográfica de forma ser possível mitigar potenciais riscos decorrentes da perda de solos e onde são apresentados os resultados.

Posteriormente os resultados foram discutidos e obtiveram-se conclusões e propostas de melhoria do sistema de aviso para tornar os resultados disponíveis em tempo real e mais fiáveis.

2. Revisão bibliográfica

Existem diversos estudos onde são abordados e analisados os fatores que influenciam direta e indiretamente a estabilidade dos solos onde a erosão é um dos fatores determinantes para acelerar o processo que pode levar ao colapso de grandes massas. Para além da erosão, a sedimentação pode ser também um problema uma vez que pode alterar cursos normais de água e com isso fazer despoletar outros fenómenos não existentes anteriormente.

Ferramentas de análise e estudo das vertentes são uma mais-valia para compreender fenómenos de degradação e estabilidade dos solos que quando utilizadas em sistemas de informação geográfica permitem uma melhor interpretação dos resultados.

As aquisições de dados para as análises geográficas podem ser obtidas mediante diferentes técnicas e ferramentas que se adaptem melhor á informação final pretendida.

2.1 Erosão

Durante muitos milhares de anos, períodos de erosão do solo alternaram com períodos de formação do solo como referem Imerson e Curfs (2008) Os períodos de erosão do solo ocorreram por várias razões. Por exemplo: quando ocorrerem fenómenos climáticos extremos, ou erupções vulcânicas, sismos, ou quando as vertentes são tornadas instáveis por movimentos geológicos ou mudanças do nível base do mar. Os fatores mais importantes que explicam a erosão histórica do solo são, contudo, o uso do solo e práticas de gestão da terra. A maior parte das vezes as mudanças nos sistemas de erosão conduzidas pela atividade humana são subtis, difíceis de quantificar e têm impactos que podem revelar-se apenas após vários séculos como concluíram Imeson e Curfs (2008) . Têm sido realizadas investigações tanto à escala microscópica como da paisagem. As ciências agrárias concentraram-se na perda de solo dos campos agrícolas e em como preveni-la usando métodos de conservação do solo. As ciências naturais têm interesse em compreender a natureza dos fenómenos de erosão em si e em relacioná-la com a mudança da paisagem.

2.1.1 - Degradação dos solos

O solo é um dos recursos mais importantes da Biosfera e do Património Natural para toda a Humanidade. Este é definido por Hans Jenny (1994) como um corpo natural, com diferentes horizontes de minerais e constituintes orgânicos, geralmente não consolidados, de profundidade variável, que

difere do material de origem, nomeadamente, na morfologia, constituição (propriedades físicas), composição (propriedades químicas) e características biológicas. Não sendo esta uma definição universal, existem outros conceitos como por exemplo, “...conjunto natural de partículas minerais que podem ser separadas por agitação na água...”, onde os vazios existentes entre si, segundo este autor, estão preenchidos por ar e água, separada ou conjuntamente (Nascimento, 1974). A dinâmica de um corpo natural composto por matéria orgânica, minerais, gases, líquidos e, também, organismos vivos (Brady & Weil, 2008), ou a camada superior da Terra, situada entre a rocha-mãe e a superfície, composta pelos mesmos elementos da definição anterior. A sua degradação é considerada como um dos maiores problemas ambientais, visto não ser renovável à escala humana (Roxo, 2000), onde a sua destruição pelos mais variados processos (físicos, químicos e biológicos) dá lugar ao empobrecimento dos ecossistemas, manifestando-se, sobretudo, na redução da produtividade e diversidade biológica (Bermúdez, F. et al, 1993).

Na formação do solo são considerados vários fatores como o clima, topografia, material de origem, organismos e tempo (Hans Jenny, 1994). No primeiro fator, os elementos do clima (radiação solar, precipitação, vento) têm influência direta na pedogénese¹, como por exemplo, a destruição de iões H⁺ pela promoção da reação da hidrólise pela água da precipitação, do qual resultam alterações da estrutura mineral e, conseqüentemente, a sua destruição. Outra particularidade do clima é a influência direta na quantidade e tipo de vegetação que se pode desenvolver numa dada área. Quanto à topografia, esta tem influência na escorrência superficial e na quantidade de água infiltrada, estando os declives acentuados associados a solos pouco profundos e vice-versa. Relativamente ao material de origem, este corresponde ao material geológico do qual o solo se origina. Já os organismos têm um papel fundamental na decomposição de restos animais e vegetais e na libertação de húmus, proporcionando a diferenciação dos solos. O fator tempo é importante na formação do solo, pois define a ação dos organismos e do clima sobre o material de origem, em determinadas condições topográficas.

Tal como na definição de solo, também o conceito de degradação do solo não tem uma definição universal, ou seja, varia de autor para autor na abrangência de processos envolvidos e nos vários resultados provenientes destes ou pode variar em função do objetivo do estudo, seja para fim agrícola, ecológico ou geológico. Por exemplo, Kuipers, (1980) considera que este processo é o resultado do desencadeamento de forças mecânicas, ação do movimento da água, da precipitação, evaporação, congelamento/descongelamento da água no solo e, também, da ação das raízes das plantas, resultando, segundo este, diferentes tipos de degradação, em períodos diferenciados. (Kimpe, 1998) considera que este corresponde à redução do funcionamento ótimo do solo nos ecossistemas. Já Bone et al., (2010) consideram-no como a mudança ou alteração da qualidade do solo, por perturbações naturais, antrópicas ou ambas.

Os vários tipos de degradação do solo podem ser encarados, por um lado pela redução da qualidade e, por outro, pela perda de quantidade. A degradação qualitativa deriva de vários fatores como a redução dos nutrientes (fator que se manifesta, sobretudo, no desenvolvimento das plantas, como refere Shukla et al. (2006), diminuição da fertilidade, poluição, entre outros (Franzuebbers & Haney, 2006; Karlena

et al., 2003), enquanto a degradação quantitativa corresponde à perda do solo por erosão, movimentos de massa, e outros (Knijff et al., 2000; Olden, 1998). Distingue-se, também, pelo processo presente, nomeadamente, a degradação física, química ou ambas. A primeira corresponde à erosão (hídrica, eólica, movimentos de massa), compactação, défice ou excesso de água, entre outros processos derivados da intervenção antrópica (Arbestain et al., 2008), como por exemplo, movimentos causados por explosivos; já a segunda corresponde à acidificação, alcalização, salinização e poluição nos mais variados tipos (urbana, industrial, agroquímica, entre outros). Quanto à degradação físico-química, esta corresponde, essencialmente, ao declínio da fertilidade pela destruição da cobertura vegetal, matéria orgânica e alteração dos agregados, ou seja, alteração da estrutura do solo. Importa mencionar que a degradação é uma componente natural, intensificada pela ação antrópica e em alguns casos desencadeada.

2.1.1.1 - Formas de Erosão

Existem diferentes tipos de erosão, como referem Imeson & Curfs, (2008) na sua investigação, que se caracterizam de diferentes formas. A erosão de **ablação** é o arranque e transporte pelo ar de pequenas partículas de solo causado pelo impacto das gotas de chuva nos solos. A erosão do tipo **laminar** é a remoção de uma fina camada de solo relativamente uniforme pela chuva e escorrência superficial largamente não canalizada como verificaram Imeson & Curfs, (2008) (figura 5).



Figura 5: Erosão laminar num campo de trigo em Portugal, perto de Mértola. Notar a cor barrenta da água, o que indica que as partículas de argila se dispersaram. (Imeson & Curfs, 2008)

O tipo de erosão em **sulcos** é um processo de erosão em campos inclinados onde numerosos canais aleatórios ocorrem com apenas alguns centímetros de profundidade, (Imeson & Curfs, 2008) e ocorre sobretudo em solos recentemente cultivados (figura 6).

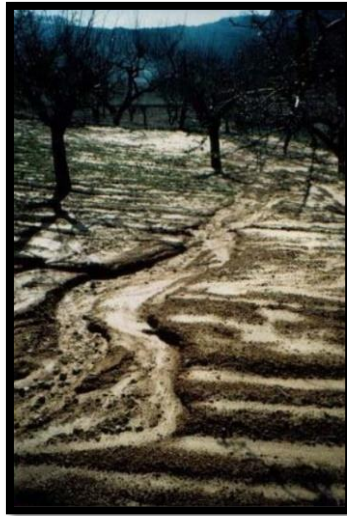


Figura 6: Erosão por sulcos como consequência da agricultura. A escorrência e erosão ocorrem por causa da compactação e enfraquecimento do solo em profundidade. (Imeson & Curfs, 2008)

A erosão em **barrancos (abarrancamento)** é o processo de erosão pelo qual a água se acumula e corta, entalha canais estreitos, por curtos períodos de tempo, que removem o solo desta área até profundidades consideráveis, (Imeson & Curfs, 2008). Um barranco tem tipicamente de 0.5m até 25 a 30m de profundidade, (figura 7), e ocorre em situações e tipos de rocha específicos. Podem formar-se rapidamente pelo recuo das cabeceiras. Os barrancos atraem frequentemente água de drenagem do solo envolvente, o que os torna instáveis.



Figura 7: Erosão em barrancos criando uma organização, dendrítica do escoamento. (Imeson & Curfs, 2008)

O tipo de erosão em **túnel** ocorre em solos que são propensos a piping (estruturas subterrâneas com uma rede de túneis, como canos) como verificaram (Imeson & Curfs, 2008) na sua investigação. Estes são, frequentemente, solos que contêm camadas ricas em argilas expansivas que se expande e contrai quando humedecida ou seca, respetivamente, ou camadas com materiais que se dispersam espontaneamente na água durante chuvadas.

2.1.1.2 - Agentes Erosivos

A erosão é um fenómeno caracterizado pelo deslocamento de terra ou de rochas, podendo ser causado pela ação do homem ou por processos naturais. Quando ocorre por ação da natureza, a erosão está associada a agentes como o vento, as águas, a presença de seres vivos e variações climáticas, que modificam os solos e outros materiais da crosta terrestre (Imeson & Curfs, 2008).

A erosão hídrica é uma consequência dos seguintes fatores:

- a) A energia da chuva (que aumenta com a intensidade da chuva);
- b) A resistência do solo (que é influenciada pela matéria orgânica, química do solo e tamanho das partículas do solo);
- c) O declive e comprimento da vertente;
- d) A vegetação e grau de cobertura do solo;
- e) As práticas de gestão.

A erosão hídrica consiste no desprendimento de material do leito do rio ou linha de água e das suas margens.

A erosão começa quando a energia do fluxo da água excede a resistência do material do leito/fundo do rio. A energia do fluxo depende da profundidade da água e do gradiente e, portanto, da velocidade do fluxo. O momento em que o material é colocado em movimento é considerado estado crítico. A tensão correspondente é denominada "tensão de cisalhamento crítica". Isso varia para diferentes partículas. (Hjulström & Flodkvist, 1936) demonstraram a relação entre a velocidade de fluxo e o tamanho de partícula da erosão, isto é, o material movimentado (figura 8).

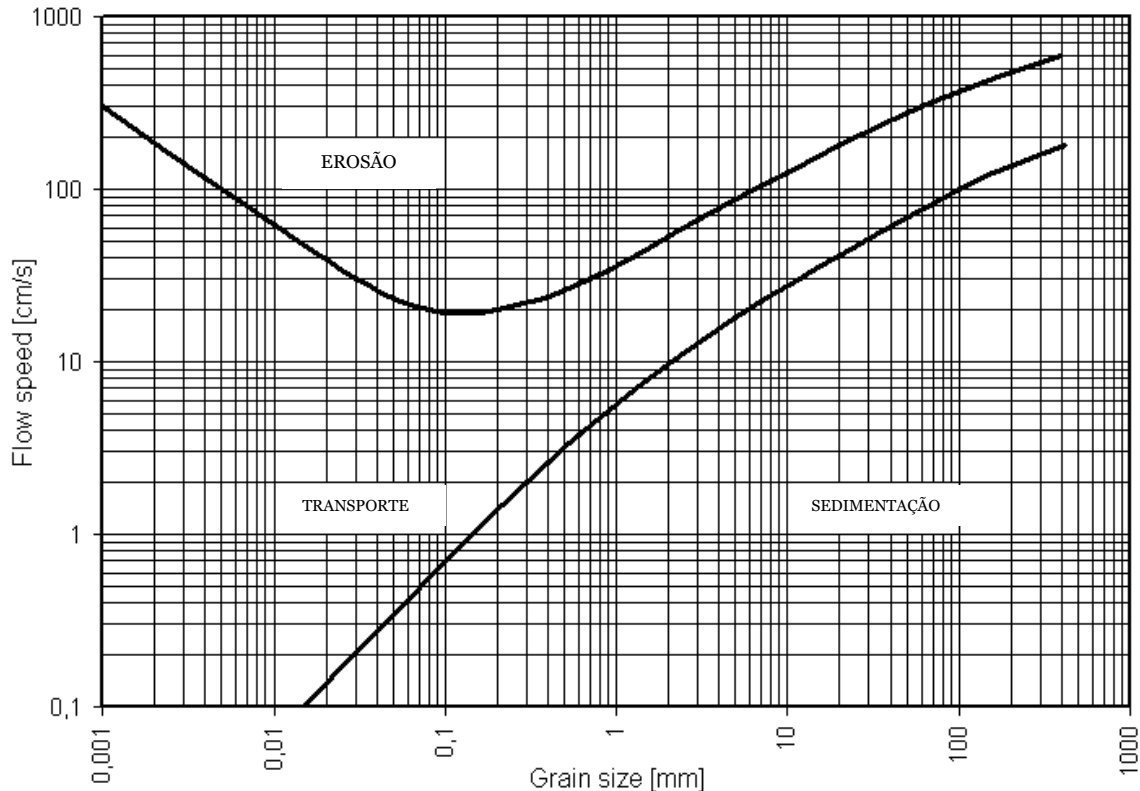


Figura 8: Relação entre a velocidade de fluxo e o tamanho das partículas (Hjulström & Flodkvist, 1936)

A erosão hídrica procede de duas maneiras, erosão vertical e lateral. A erosão **vertical** dá-se quando um rio erode o seu leito, ou seja, torna-se mais profundo e o vale mais escavado, a erosão **lateral** ocorre quando um rio erode a sua margem; isto é, o rio alarga-se (Freie Universitat, 2021) . Isso resulta frequentemente em sérios problemas, como a perda de terras normalmente agrícolas. A vegetação densa na margem do rio pode impedir a erosão das margens e bancos de detritos/sedimentos.

2.2 Quantificação de Perda de Solos

A perda de solos é um fenómeno que potencia possíveis acidentes a jusante ou a montante do local e não raras vezes difícil de controlar. Segundo (Imeson & Curfs, 2008), o transporte de partículas ao longo das linhas de água faz com que estas se depositem e locais mais planos ou de menor corrente ocorrendo assim a sedimentação. A sedimentação em locais não controlados pode levar a consequências futuras como a alteração de cursos de água, alteração nas correntes e assoreamento de barragens. A sedimentação de detritos é muito difícil de controlar e a melhor forma de evitar o fenómeno é identificar o problema a montante com a erosão de encostas e linhas de água.

Para a determinação de zonas potencialmente instáveis é necessária uma grande quantidade de informação que permite uma análise em função de vários fatores como a cobertura do solo, erosão, precipitação, orografia do terreno, entre outros.

Apesar de eventos catastróficos poderem causar danos estruturais em barragens, o assoreamento contínuo e lento através do movimento de partículas de solo, continua a ser uma das principais causas de colmatação de albufeiras. Neste sentido torna-se necessário estudar e quantificar a perda de solos para assim ser possível uma análise de risco mais assertiva em relação à segurança de estruturas como barragens.

Uma forma de analisar todos os dados existentes e torná-los úteis para apoio à decisão, é recorrendo a sistemas de informação geográfica que, de forma integrada, efetua análises espaciais dos dados que resultam numa informação muito precisa e direcionada para a finalidade que é pretendida.

2.2.1 - Equação universal de Perda de Solos (EUPS)

Recorrer a modelos que traduzam espacialmente a erosão do solo é fundamental, principalmente, na determinação das áreas mais suscetíveis à ocorrência deste fenómeno, de forma a tomar medidas eficazes sobre as decisões a tomar. A Equação Universal da Perda de Solo (EUPS), ou USLE, proposta por (Wischmeier & Smith, 1978) é um dos modelos mais utilizado na estimativa da erosão hídrica anual. Conforme mencionado por Williams, (1975) esta equação foi alvo de várias modificações (MUSLE), até à sua revisão (RUSLE) referida por Renard & Freimund, (1994). A EUPS é um modelo multiplicativo e tem por base o tratamento parcelar de cada um dos fatores que integram este processo, conforme representado no esquema seguinte, resultando a estimativa da erosão específica, ou seja, a perda de solo por unidade de área e por unidade de tempo (Wischmeier & Smith, 1978) e (Coutinho & Tomás, 1993). Assim, como definido anteriormente, a Equação universal de Perda de Solos é dada pela seguinte expressão;

Equação 1: Equação Universal de Perda de Solos

$$A = 2,24 \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

em que:

A – Erosão Específica do Solo (t ha⁻¹ ano⁻¹);

R – Fator Erosividade

K – Fator Erodibilidade

LS – Fator Topográfico

C – Fator de Coberto Vegetal

P – Fator de Prática Agrícola

A definição da equação da EUPS proposta pela Comissão Nacional do Território (Comissão Nacional do Território, CNT, 2017) pretende identificar a perda de solo por unidade de área e por unidade de tempo, mais precisamente a erosão específica.

Segundo Recomendação Técnica da Comissão Nacional do Território a delimitação das áreas de elevado risco de erosão Hídrica do solo deverá seguir a Equação Universal de Perda do Solo (EUPS), adaptada a Portugal continental que resulta do cálculo da perda de solo específico (*Pse*) de acordo com a seguinte expressão:

Equação 2: Perda de Solo Específico

$$Pse = SDR \cdot A$$

Em que:

SDR – é a razão de cedência dos sedimentos (adimensional)

A – é a erosão específica do solo ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$).

Ainda segundo a Comissão Nacional do Território, por Recomendação Técnica publicada pela Resolução do Conselho de Ministros (RCM) nº 81/2012, de 3 de outubro, retificada pela Declaração de retificação nº 71/2012, de 30 de novembro, aprova as Orientações Estratégicas de âmbito Nacional e Regional (OENR) para a delimitação das Áreas de Elevado Risco de Erosão Hídrica do Solo (AEREHS) apoiando-se na identificação da erosão potencial do solo, através da aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (EUPS), adaptada a Portugal continental e à unidade de gestão bacia hidrográfica. E definida ainda a Razão de cedência dos sedimentos (*SDR*), expressa em % definida pela equação 3:

Equação 3: Razão de cedência dos sedimentos

$$SDR = 0.332 \cdot Ab^{-0.2236}$$

Sendo *Ab* a área de drenagem (Km²).

As AEREHS são as que, devido às suas características de solo e de declive, estão sujeitas à perda excessiva de solo por ação do escoamento superficial, pelo que a avaliação da suscetibilidade à erosão hídrica do solo deverá ser feita com base nas variáveis físicas (erosão potencial), como a intensidade da precipitação, erodibilidade dos solos, comprimento e declive das vertentes.

A EUPS, permite assim, estimar a erosão média anual do solo e combina um conjunto de fatores condicionantes, articulados a partir da equação 1 conforme esquema da figura 9.

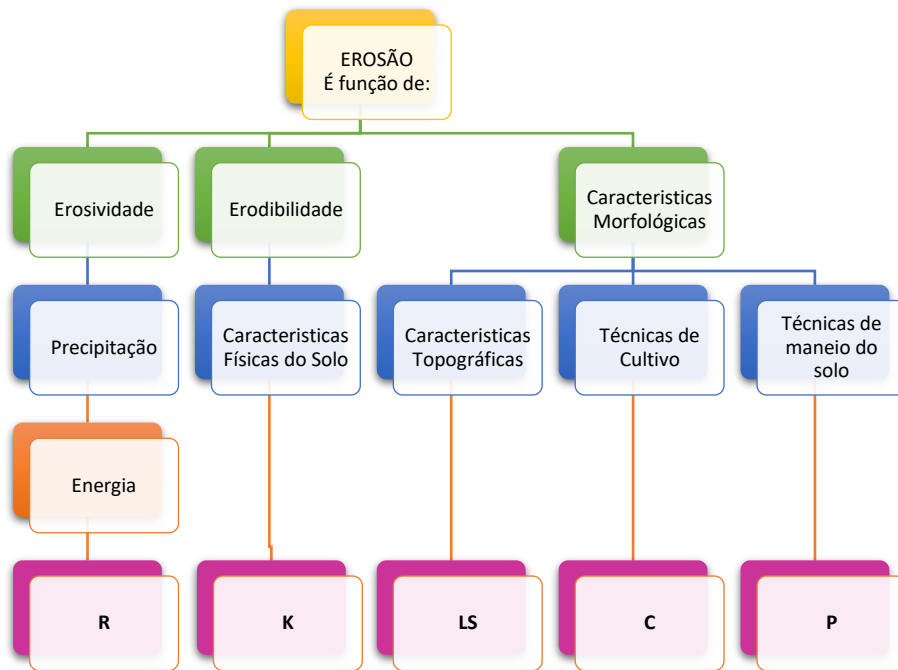


Figura 9: Fatores que afetam a erosão hídrica do solo (Ferreira 2008).

O cálculo desta equação obedece à determinação prévia de vários fatores segundo a metodologia representada no esquema da figura 10.

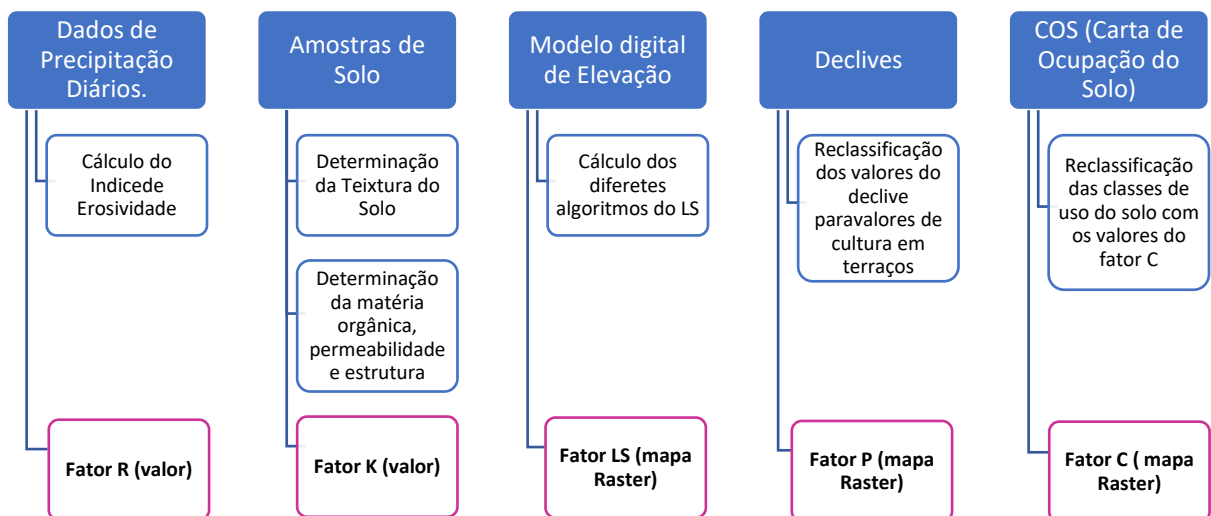


Figura 10: Sequência metodológica do modelo EUPS (CNT, 2015)

A aplicação da EUPS deve atender-se às limitações a seguir referidas:

- A EUPS prevê a perda de solo, não devendo ser aplicada na previsão da erosão específica de acontecimentos pluviosos independentes.
- A EUPS não considera a deposição de partículas de solo ao longo da encosta. Assim, a produção de sedimentos de uma encosta obtém-se da erosão específica calculada pela EUPS deduzida da deposição que possa ocorrer em depressões, na base das encostas e sempre que os agentes erosivos não disponham de energia suficiente para o transporte.

2.2.1.1 - Fator de Erosividade, R

É o fator de erosividade da precipitação cujos valores, segundo a CNT (Comissão Nacional do Território, CNT, 2017), que regulamentou as fórmulas de cálculo, constam do cartograma Erosividade da Precipitação (449 postos 50.8 mm). Este fator é atualmente dado em unidades anglo-saxónicas (ton americanas por pé por acre). Os dados geográficos em formato vetorial estão disponíveis no Sistema Nacional de Informação do Ambiente, SNIAmb, (APA, 2022) e se as unidades utilizadas forem no Sistema Internacional ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), a constante de conversão 2,24 não é necessária, devendo ser considerada a mesma precipitação de 50,8 mm como é o caso nesta aplicação para condições de precipitação mais desfavoráveis.

2.2.1.2 - Fator de Erodibilidade, K

É o fator relativo à erodibilidade do solo, cujos valores estão disponíveis nas “Diretrizes para a Aplicação da Equação Universal da Perda de Solos em SIG”, (Pimenta, 1999) publicado pelo INAG.

A determinação da erodibilidade do solo pressupõe o conhecimento dos seus constituintes no que se refere ao conteúdo em areia, limo, argila e matéria orgânica, bem como à informação sobre a permeabilidade e a estrutura. As características físico-químicas do solo têm um efeito variado nos valores de erodibilidade. Além disso, muitos mecanismos de erosão atuam ao mesmo tempo, relacionados com cada propriedade específica do solo.

Os valores de erodibilidade tornam-se mais difíceis de estimar se se tiver em conta a humidade do solo antecedente, as condições físicas da superfície do solo e as variações sazonais das suas propriedades. Como estas condições e propriedades tendem a ser homogéneas para uma determinada época do ano, considera-se, no entanto, que o valor de erodibilidade sazonal pode reduzir os erros na estimativa da perda de solo, como já está previsto na EUPS.

2.2.1.3 - Fator Topográfico, LS

É o fator topográfico (CNT, 2015) que exprime a importância conjugada do comprimento da encosta (L) e do seu declive (S). É um fator adimensional determinado pela expressão:

Equação 4: Fator Topográfico

$$LS = \left(\frac{\lambda}{72.6} \right)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.54 \sin \theta + 0.065)$$

λ - é o comprimento do desnível, em pés. Caso o valor seja dado em metros, utiliza-se a expressão: $\lambda/22,3$

θ - é o ângulo associado à inclinação do desnível, em radianos;

m - é um coeficiente dependente do declive que assume os seguintes valores:

Tabela 1: Coeficiente dependente do declive para cálculo do fator topográfico

Declive	<i>m</i>
S ≥ 5%	0,54
3% ≤ S < 5%	0,40
1% ≤ S < 3%	0,30
S < 1%	0,20

Em ambiente SIG, o fator LS foi determinado recorrendo ao software SAGA que por defeito utiliza a equação de Moore & Nieber (1989):

Equação 5: Fator Topográfico ((Moore & Nieber, 1989))

$$LS = (m + 1) \times (A/22.13)^m \times (\sin\beta/0.0896)^n$$

$m = 0.4$ (valores entre 0.2–0.6)

$n = 1.3$ (valores entre 1.0–1.3)

$A = \text{Área}$

$B = \hat{\text{Ângulo do Declive}}$

Como o fator LS estabelece uma relação entre o comprimento (L) e o declive (S) de uma vertente, constituindo um dos fatores que maior influência exerce sobre a erosão, embora seja muito

condicionado pelo tipo de cobertura do solo (fator C) e pela prática agrícola (fator P), assim como pelos aspectos texturais traduzidos pelo fator K , torna-se de extrema importância o cálculo cuidadoso e com a maior resolução/precisão possível.

2.2.1.4 - Fator de Coberto Vegetal, C

É o fator relativo à ocupação do solo. Existem várias interpretações para a aplicação deste fator uma vez que é possível ser determinada utilizando diversas fontes. Segundo a Comissão Nacional do Território (CNT, 2015) para efeitos de delimitação da REN (Reserva Ecológica Nacional), a aplicação deste fator ao território municipal apresenta limitações, podendo não traduzir a mutabilidade relacionada com as alterações ao uso e ocupação do solo nos valores finais da erosão específica do solo. Assim, e por forma a assumir um carácter preventivo, pode considerar-se o valor de C constante e igual a 1.

Existe, no entanto, outra normativa, publicada em Resolução do Conselho de Ministros nº 81/2012 (RCM n.º 81/2012, 2012) onde fator relativo ao tipo de culturas e sua sequência, baseado na correspondência entre as cartas Corine Land Cover COS'90 e o valor de C proposto por (Pimenta, 1998).

A publicação do INAG (Pimenta, 1998) indica as classes de uso do solo LandCover - CORINE/COS e respetivo valor do fator C . A carta de Ocupação do Solo (escala 1:25 000) inclui informação sobre o grau de ocupação relativo à floresta e outras considerações, sendo aconselhável aumentar ou diminuir o valor do fator C atribuído, consoante a cobertura do solo é menor ou maior, respetivamente. No caso de solo desprotegido (corte raso ou fogo) o valor do fator C a atribuir deverá ser de 0,5 independentemente da espécie florestal presente.

Os valores utilizados para o fator C , encontram-se na tabela 3, foram os recomendados pelo INAG (Pimenta, 1998) que para além do fator C , correlaciona as classes de uso da carta CORINE/COS com o fator K , já referenciado anteriormente.

Tabela 2: Classes de uso do solo LandCover - CORINE e respetivo valor de C e K

	Agrupamento	Fator K	Código	Descrição	Fator C
Territórios Artificializados	Zonas com dominância de habitações	0.01	1110	Tecido urbano contínuo	0.005
			1120	Tecido urbano descontínuo	0.01
	1210		Espaços de atividades industriais, comerciais e de equipamentos gerais	0.01	
	1220		Infraestruturas da rede de auto-estradas e da rede ferroviária	0.01	
	1230		Zonas portuárias	0.01	
	1240		Aeroportos	0.01	
	Zonas com revestimento dominante artificializado				

Tabela 3: Classes de uso do solo LandCover - CORINE e respetivo valor de C e K (continuação)

Agrupamento		Fator K	Código	Descrição	Fator C
Territórios Artificializados	Zonas alteradas artificialmente sem vegetação	0.3	1310	Pedreiras, zonas de extração de areia, minas a céu aberto	0.5
			1320	Descargas industriais, zonas de espalhamento de lixos	0.1
			1330	Estaleiros	0.01
	Zonas verdes ordenadas	0.02	1410	Espaços verdes urbanos	0.02
			1420	Zonas com equipamentos desportivos e de ocupação dos tempos livres	0.02
Área com ocupação agrícola	Áreas agrícolas com culturas anuais	0.3	2110	Zonas de utilização agrícola fora dos perímetros de rega	0.4
			2120	Perímetros regados	0.2
			2130	Arrozais	0.05
	Culturas permanentes	0.1	2210	Vinhas	0.2
			2211	Vinhas + Pomar	0.15
			2212	Vinha + Olival	0.2
			2220	Pomares	0.05
			2221	Pomar + Vinha	0.1
			2222	Pomar + Olival	0.1
			2230	Olivais	0.1
			2231	Olival + Vinha	0.1
	2232	Olival + Pomar	0.1		
	Pastagens	0.02	2310	Permanentes	0.02
	Zonas agrícolas heterogéneas	0.3	2410	Culturas anuais associadas às culturas permanentes	0.4
			2420	Sistemas culturais e parcelares complexos	0.2
2430			Terras ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais importantes	0.3	
2440			Territórios agro-florestais	0.3	
3110			Folhosas	0.1	
Florestas e meios semi-naturais	Florestas	0.1	3111	Sobreiro	0.1
			3112	Azinheira	0.1
			3113	Sobreiro/Azinheira	0.1
			3114	Castanheiro	0.1
			3115	Carvalho	0.1
			3116	Eucalipto	0.2
			3120	Resinosas	0.05
			3121	Pinheiro Bravo	0.05
			3122	Pinheiro Manso	0.05
			3130	Floresta com mistura de várias espécies florestais	0.05

Tabela 4: Classes de uso do solo LandCover - CORINE e respetivo valor de C e K (continuação)

	Agrupamento	Fator K	Código	Descrição	Fator C
Florestas e meios semi-naturais	Zonas com vegetação arbustiva ou herbácea	0.02	3210	Pastagens pobres, trilhos	0.05
			3220	Landes e matagal	0.02
			3230	Vegetação esclerofítica (maquinal, carrascal e esteval)	0.02
			3240	Espaços florestais degradados	0.1
	Zonas descobertas sem ou com pouca vegetação	0.4	3310	Praias, dunas, areias e solos em cobertura vegetal	0.05
			3320	Rochas nuas	0.01
			3330	Estepes sub-desérticas	0.5
			3340	Zonas incendiadas recentemente	0.5
			3350	Neves eternas e glaciares	0
	Meios aquáticos	Zonas húmidas continentais	0.005	4110	Zonas apaúladas
4120				Turfeiras	0
Zonas húmidas marítimas		0.005	4210	Sapais	0.005
			4220	Salinas	0.005
			4230	Zonas intertidais	0.005
Superfícies com água	Zonas de água doce	0	5110	Linhas de água	0
			5120	Planos de água, lagos	0
	Zonas de água salgada	0	5210	Lagunas e cordões litorais	0
			5220	Estuários	0
			5230	Mar e Oceano	0

A carta de ocupação de solos utilizada para este estudo foi a COS2010 (DGT, 2010) publicada pela Direção Geral do Território representado na figura 11, uma vez que era a mais atualizada e detalhada à data da realização do modelo.

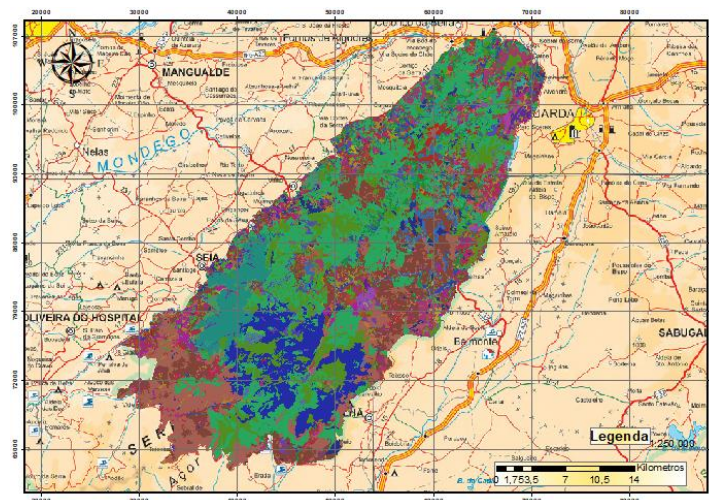


Figura 11: Representação COS 2010

A Carta de Ocupação do Solo, COS, é o mapeamento das classes de uso e ocupação do solo e permite uma leitura geral do aproveitamento dos recursos territoriais e perceber macropaisagens que refletem a diversidade do território continental.

2.2.1.5 - Fator de Prática Agrícola, P

A CNT (CNT, 2015) refere que a aplicação deste fator ao território apresenta fortes limitações, não havendo informação disponível que permita traduzir a sua heterogeneidade nos territórios municipais. Por outro lado, a aplicação da metodologia tem demonstrado que a consideração deste fator distorce os valores da erosão potencial que se pretende avaliar, desfasando-os da realidade. Assim, por forma a assumir um carácter preventivo, deve utilizar-se no fator P o valor de 1, o que foi feito para este trabalho.

2.3 Estabilidade de vertentes

Um movimento de massas é definido como o movimento de um conjunto de rocha, detritos ou terra ao longo do declive, estando relacionados, principalmente, com a ação da gravidade por definição da (USGS, 2021). Deslizamentos de terra são um tipo de "perda de massa", que denota qualquer movimento descendente do solo e da rocha sob a influência direta da gravidade. O termo "deslizamento de terra" engloba alguns modos de movimento de inclinação: quedas, derrocadas, deslizamentos e por fluxos. Estes são ainda subdivididos pelo tipo de material geológico (rocha, detritos ou terra). Fluxos de detritos (comumente conhecidos como fluxos de lama ou deslizamentos de terra) e quedas de rochas são exemplos de tipos comuns de movimentos de massas ainda segundo a (USGS, 2021).

Existe um outro fenómeno associado ao deslizamento de massas, designado por "slumps" (Zamora et al., 1993), que se caracteriza por um deslizamento de massa que ocorre quando uma massa coerente de materiais fracamente consolidados ou uma camada de rocha se desloca numa curta distância descendo uma vertente. O movimento é caracterizado pelo deslizamento ao longo de uma superfície côncava ou plana.

Quase todos os deslizamentos de terra tem múltiplas causas. O deslizamento ocorre quando as forças que atuam no declive inferior (principalmente devido à gravidade) excedem a força dos materiais de terra que o compõem. As causas incluem fatores que aumentam os efeitos das forças de declive e fatores que contribuem para a força baixa ou reduzida. Os deslizamentos de terra podem ser iniciados em declives já perto do colapso pela chuva, fusão da neve, alterações do nível freático, erosão das linhas de água, alterações nas águas subterrâneas, terremotos, atividade vulcânica, perturbação por alteração da geometria ou qualquer combinação desses fatores (Da Silva et al., 2011). Terremotos, marmotos e outros fatores também podem induzir deslizamentos de massas debaixo de água (Strasser et al., 2011). Isto ocorre quando o grau de saturação desequilibra as tensões neutras no maciço. Estes deslizamentos são

denominados deslizamentos submarinos. Deslizamentos submarinos por vezes causam tsunamis que danificam as áreas costeiras como foi exemplo o sismo de 1755 em Lisboa (Cuven et al., 2013).

Deslizamentos subaquáticos ocorrem em todo o mundo numa grande variedade de configurações, incluindo lagos, zonas costeiras e zonas de vertente ativas ou passivas como glaciares ou fluviais. A instabilidade da encosta é, portanto, um potencial perigo para muitos projetos subaquáticos e projetos de construção. Segundo (Vanneste et al., 2013), movimentos de massa ao longo do fundo do mar invariavelmente irão criar ondas na superfície do oceano (tsunami) que podem propagar-se em grandes distâncias. Dependendo da natureza e tamanho do deslizamento, bem como a sua localização, os efeitos do tsunami ao longo da costa é imprevisível e extremamente destrutivo. Isto implica que há uma necessidade geral de avaliar adequadamente o perigo associado com as instabilidades de declives subaquáticos e quais as suas consequências, de modo a avaliar e conceber medidas de mitigação. Deslizamentos de terra têm três fases principais de desenvolvimento, nomeadamente (i) uma fase de pré-condicionamento, (ii) a desencadeamento do movimento, e (iii) finalmente o deslizamento e (Vanneste et al., 2013) ainda difíceis de observar e monitorizar de modo a realizar uma prevenção adequada.

Ainda segundo (Vanneste et al., 2013), a fase de pré-condicionamento refere-se ao período de tempo em que o maciço se vai acondicionando até que um fenómeno desencadeie o seu colapso, na segunda fase, onde se desencadeia o movimento. Este fenómeno poderá ter diversas origens, como por exemplo sísmicas, liquefação, rotura por falha do maciço que por consequência dá início à terceira fase, o deslizamento, (figura 12).

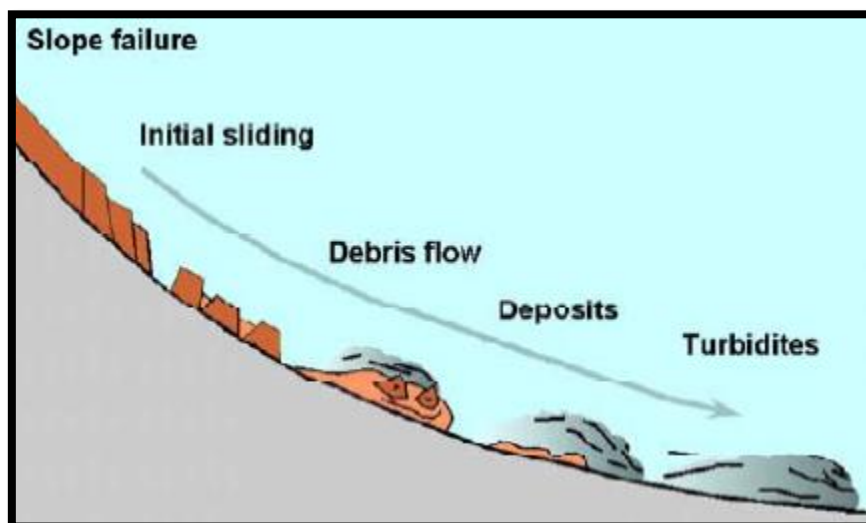


Figura 12: Representação esquemática da evolução de um deslizamento subaquático (National Oceanography Centre, 2018).

2.3.1 - Mecânica dos solos

Existem duas categorias principais de causas de movimentos de massas: os naturais e os causados pelo homem. Por vezes, movimentos de terra são causados, ou agravados, por uma combinação dos dois fatores.

Segundo (Highland & Bobrowsky, 2008), saturação de água em declives é a principal causa dos deslizamentos de terra. A saturação pode ocorrer sob a forma de chuvas intensas, degelo, mudanças nos níveis de água no solo, mudanças do nível de água na superfície ao longo da orla costeira, barragens de terra e nas margens dos lagos, reservatórios, canais e rios. Deslizamentos e inundações estão intimamente associados, pois ambos estão relacionados com a precipitação, escoamento e saturação do solo por água. Além disso, detritos sólidos podem amontoar-se, ou adicionar volume e densidade a vazões normais de cursos de água causando bloqueios de canais e desvios, criando condições de inundação ou erosão localizada.

Muitas áreas montanhosas que são vulneráveis a deslizamentos experimentam, por vezes alguma atividade sísmica. Terremotos em áreas íngremes, propensas ao deslizamento de terra, aumentam consideravelmente a probabilidade de ocorrência desse fenómeno, devido ao tremor isolado do solo, liquefação dos sedimentos suscetíveis, ou dilatação de materiais do solo causada pela agitação, o que permite infiltração rápida de água.

Deslizamentos devido à atividade vulcânica representam alguns dos tipos mais devastadores de ruturas do solo. A lava vulcânica pode degelar a neve rapidamente, o que pode dar forma a um dilúvio de rochas, solo, cinzas e água que se acelera rapidamente nas encostas íngremes dos vulcões, destruindo tudo pelo caminho. Esses fluxos de detritos vulcânicos podem atingir grandes distâncias. Formações vulcânicas são estruturas jovens, não consolidadas, geologicamente fracas que, em muitos casos, podem ruir e causar deslizamentos de rochas e avalanches de detritos

Nos maciços rochosos, segundo (Rodrigues, 1997), são considerados meios descontínuos devido, regra geral, à existência de descontinuidades. Estas descontinuidades englobam as fraturas, que pelo seu aproveitamento não levam a deslocamentos tangenciais entre as superfícies, designando-se estas fraturas por diáclases; quando existem deslocamentos tangenciais entre as superfícies, as fraturas recebem o nome de falhas.

2.3.2 - Suscetibilidade a eventos destrutivos

As cartas de suscetibilidade são documentos cartográficos que representam a possibilidade de ocorrência de um determinado evento (Cantarino et al., 2019), que no caso deste projeto está relacionado à ocorrência de movimentos de solos ou rochas.

O objetivo geral dos trabalhos de cartografia de áreas suscetíveis apresentados neste estudo é o de estabelecer bases tecnológicas para o desenvolvimento contínuo de um modelo integrado e atualizável

de produção de cartas de suscetibilidade a processos do meio físico que podem gerar desastres naturais. Visa-se, sobretudo, capacitar diversas entidades nas suas ações de planeamento e gestão territorial e de prevenção de desastres naturais.

Entre os objetivos específicos dos trabalhos de cartografia de áreas suscetíveis, destacam-se:

- Gerar cartas de suscetibilidade a movimentos de massas e a processos hidrológicos para as zonas estudadas, em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), integrando todos os dados obtidos;
- Sintetizar os principais resultados num documento cartográfico, contendo as zonas de suscetibilidades e outras informações relacionadas de interesse, apresentado em linguagem acessível a um público o mais amplo possível;

Uma vez que a informação disponibilizada e estudada é de âmbito académico, é realizado um estudo de suscetibilidade e não um estudo de risco uma vez que os conceitos diferem e obedecem a determinados fatores (Julião et al., 2009).

Considerando as referências citadas, sintetizam-se a seguir os conceitos que importa detalhar e entende-se por:

- Suscetibilidade, a tendência para o desenvolvimento de um fenómeno ou processo em numa determinada área;
- Ameaça, fenómeno ou processo cuja dinâmica pode gerar consequências negativas (perdas e danos) em relação aos elementos expostos;
- Vulnerabilidade, é grau de perdas e danos associados aos elementos expostos (0 a 1); quanto maior o grau, maior a vulnerabilidade;
- Severidade, é a capacidade de um evento para gerar perdas e danos; magnitude do evento;
- Perigo, é a condição com potencial para gerar perdas e danos num dado período de tempo; perigosidade;
- Risco, é uma medida da ameaça e das consequências (financeiras, bens, vidas) que esta poderá causar num dado intervalo de tempo;
- Desastre natural, é a rutura da dinâmica socioeconómica decorrente de evento associado a fenómeno ou processo natural;
- Resiliência, é a capacidade da comunidade exposta ao perigo e ao risco em recuperar-se das consequências de um desastre natural.

2.3.3 - Acidentes

Ao longo da história foram registados diversos acidentes provocados por movimentos de massas, muitos deles provocando um elevado número de vítimas.

O deslizamento de terras de Kostanjek é o maior deslizamento de terras na República da Croácia, localizado na área residencial ocidental da cidade de Zagreb. O deslizamento foi identificado em 1963 e a principal causa do deslizamento foi a escavação da marga no sopé da encosta. A investigação da universidade de Zagreb (Marendić et al., 2017), do deslizamento de terra de Kostanjek é um dos objetivos do projeto de pesquisa científica conjunta do Japão e Croácia. Como parte do projeto científico, foi implementado um sistema de monitorização em tempo real para controlo de estabilidade do solo. O sistema de monitorização (figura 9) consiste de múltiplas redes de sensores, incluindo 15 sensores GNSS. A partir de levantamentos de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), os movimentos do escorregamento, assim como as mudanças na topografia da superfície, podem ser detetados, o que permite obter informações mais detalhadas sobre a dinâmica de escorregamentos, necessárias para o estudo da atividade de escorregamentos (figura 13).

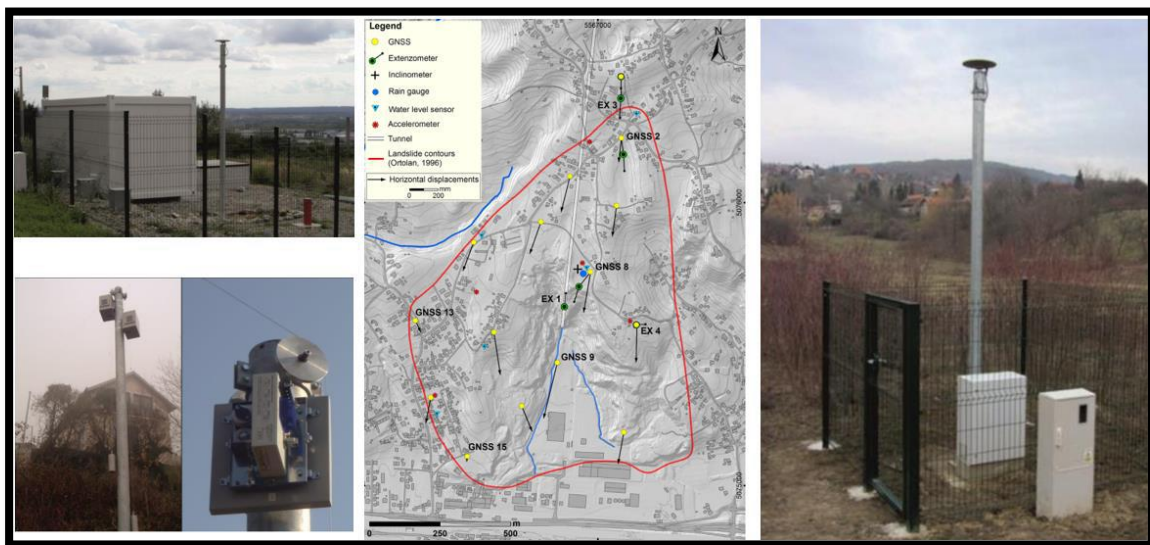


Figura 13: Zona de Influência e instrumentação implantada (Marendić et al., 2017).

2.3.4 - Tsunamis originados por movimentos de massas

Pesquisas realizadas por (Paris et al., 2020) nas Ilhas Canárias concluem que houve pelo menos cinco deslizamentos maciços de encostas vulcânicas ocorridos no passado e que grandes eventos semelhantes podem ocorrer no futuro. Deslizamentos de terra gigantes nas Ilhas Canárias poderiam gerar grandes

ondas de tsunamis a curtas distâncias, mas também, devastar grandes áreas de terras costeiras tão distantes quanto a costa leste da América do Norte.

Na ilha do Fogo, Cabo Verde, o vulcão que constitui a ilha sofreu um colapso de grandes dimensões, há cerca de 73 mil anos (Paris et al., 2020; Ramalho et al., 2015), que desencadeou um tsunami com ondas de mais de 270 metros de altura. Este fenómeno foi comprovado pela existência, a grandes altitudes, de blocos de basalto provenientes do vulcão do Fogo nas ilhas de Santiago e de maio, localizadas respetivamente a cerca de 55 e a 115 km a leste da ilha do Fogo, indicando que aquelas ilhas foram inundadas pela onda gigante. Os dados de campo documentam o impacto de ondas até pelo menos 170 metros acima do atual nível do mar.

Um dos aspetos que este estudo expõe é a problemática da ocorrência de movimentos de vertente em ilhas vulcânicas, fenómenos que ocorrem subitamente e de um modo catastrófico, e que são geradores de tsunamis de grandes dimensões, refere ainda o autor (Ramalho et al., 2015).

A ilha do Fogo eleva-se atualmente a 2.829 metros acima do nível do mar, sendo que o vulcão atualmente ativo foi reconstruído dentro da cicatriz do movimento de vertente criada há 73 mil anos. A energia potencial para novo colapso de grandes dimensões continua a existir, pelo que é imprescindível manter a vigilância, relembram os autores do estudo. A atividade vulcânica mais recente ocorreu entre novembro de 2014 e fevereiro deste ano, tendo atingido os povoados de Portela, Bangaeira e Ilhéu de Losna que se localizam no interior da caldeira.

Noutro caso, onde quedas de rochas e avalanches de rochas em enseadas costeiras como aquelas que ocorreram no passado em Tidal Inlet no Parque Nacional Glacier Bay, no Alasca, (Ward & Day, 2010) refere que têm o potencial de causar tsunamis regionais que representam um perigo para ecossistemas costeiros e fixação de Humanos. A 9 de julho de 1958, um terremoto de magnitude 7,9 na falha Fairweather provocou uma avalanche de rochas na cabeça da Baía de Lituya, no Alasca. O movimento de massas gerou uma onda que levantou 524 metros na costa oposta e enviou uma onda de 30 metros de altura pela baía de Lituya, afundando dois barcos de pesca e matando duas pessoas.

2.4 Barragens

As barragens, entendidas como estruturas construídas pelo Homem com a finalidade de reter água, foram desde cedo um elemento indispensável para a adaptação da civilização humana ao ambiente natural e para a melhoria da qualidade de vida das populações.

As barragens têm servido, desde há 5000 anos, para armazenar água em tempo de disponibilidade, fornecendo-a quando se torna mais escassa nos cursos de água contribuindo ainda para mitigar efeitos inconvenientes de secas e cheias, (figura 14) com o armazenamento de água no rio Mondego pela barragem da Aguieira.

Foi sobretudo nos últimos 50 anos que os avanços da tecnologia tornaram possível a construção de barragens de muito grande dimensão. Atualmente a capacidade de armazenamento em albufeiras é de aproximadamente 6000 Km³ (LeCornu, 1998).



Figura 14: Vista aérea da Albufeira da Barragem da Aguieira (Foto de Penacovactual.pt 2019/05/26)

São diversos os motivos que justificam a construção de barragens. Referem-se as principais:

- Rega
- Produção de Energia
- Abastecimento de Água, para usos Domésticos e Industriais.
- Controlo de Cheias
- Regularização de caudais
- Armazenamento de rejeitados de explorações mineiras
- Controlo de propagação de marés.

Segundo estudos recentes, prevê-se um aumento generalizado da temperatura à superfície da Terra na ordem de 1.5°C a 4.5°C até ao ano 2100 (Antunes do Carmo, 2013). A maior quantidade de energia armazenada na atmosfera, em virtude do aquecimento global, conduzirá inevitavelmente a uma intensificação do ciclo hidrológico e, conseqüentemente, a profundas assimetrias espaciais e temporais da precipitação nas diferentes regiões do globo. São previsões globais, mas é manifesto que também em Portugal as distribuições sazonais das precipitações têm sofrido alterações profundas ao longo dos últimos anos. Há locais em que a precipitação tem diminuído; há outros, porém, em que a mesma tem aumentado. De igual modo, também os ciclos hidrológicos têm sofrido alterações significativas. Na primeira década deste século viveram-se em Portugal várias situações de verdadeira calamidade, resultantes quer de prolongados períodos de seca que conduziram a situações dramáticas quer do excesso de pluviosidade em curtos espaços de tempo, que conduziram a importantes prejuízos.

Uma das medidas estruturais mais correntes em Portugal, à semelhança de outros países, consiste na construção de barragens e conseqüente constituição de albufeiras. A exploração destes empreendimentos exige uma correta coordenação entre as diversas entidades com competências na sua gestão, em particular tratando-se de obras com funções de regularização fluvial, pelas fortes implicações que medidas de gestão incorretas poderão provocar em todo o vale situado a jusante (Antunes do Carmo, 2013).

2.4.1 - Grandes barragens: vulnerabilidades e riscos

Para além da situação de cheia resultante de condições hidrológicas extremas, outras ocorrências muito menos frequentes, mas com conseqüências muito mais dramáticas, estão associadas a acidentes resultantes do galgamento e/ou da rotura de uma barragem (Antunes do Carmo, 2013). De entre estas destacam-se: o desmoronamento ou escorregamento de encostas submersas ou marginais, com formação de grandes ondas na superfície livre da água, e a ocorrência de um sismo que, dando origem a um movimento do tipo oscilatório, irá excitar um escoamento e provocar forças hidrodinâmicas. Importa notar que um sismo poderá agir diretamente sobre o corpo de uma barragem, ou exercer uma ação indireta sobre esta ao provocar o deslizamento de uma encosta da albufeira, por exemplo. Nos estudos a desenvolver em fase de projeto de um aproveitamento hidráulico que compreenda a criação de uma albufeira com dimensões apreciáveis, a consideração destes tipos de acidentes torna-se assim recomendável, em particular no caso do levantamento geológico das margens apontar para a existência de zonas com potencial risco de escorregamento para as condições futuras após a entrada em exploração da albufeira. As zonas de elevada sismicidade deverão merecer especial cuidado. Neste contexto, colocam-se várias questões que carecem de respostas devidamente fundamentadas, tendo presentes as diversas sensibilidades: técnica, científica, económica e social. No essencial, em termos genéricos, e carecendo sempre de adaptação às especificidades locais, importará avaliar e decidir quanto à viabilidade (ou não) de um grande empreendimento desta natureza tendo em conta o balanço que resultar de respostas às seguintes questões: Quais são os benefícios das grandes barragens? Porque se opõem muitos investigadores à construção de grandes barragens? Porque rompem as barragens? O que deverá ser feito para melhorar a segurança? (Antunes do Carmo, 2013)

2.4.2 - Ruras em barragens

Os casos históricos de roturas são representativos das principais causas de acidentes com barragens. Uma análise de (Antunes do Carmo, 2013) aos casos ocorridos no século passado, facilmente se identifica as principais razões:

- deficiências construtivas;
- atos de sabotagem e operações militares;

- exploração inadequada da albufeira, nomeadamente em consequência de um hidrograma de maiores proporções, ou de uma importante sequência de cheias;
- ocorrência de um sismo intenso, podendo dar origem a solicitações hidrodinâmicas excessivas e/ou provocar escorregamentos de encostas e/ou no fundo da albufeira; e,
- degradação da estabilidade ou resistência do corpo da barragem, das fundações e/ou ainda das encostas da albufeira. Estudos estatísticos revelam que o período crítico da vida de uma barragem ocorre durante a sua construção ou no primeiro enchimento completo da albufeira, prolongando-se até 5 a 7 anos após a sua conclusão. Contudo, importa notar que esta conclusão é limitativa, pois refere-se fundamentalmente à primeira ocorrência acima identificada (deficiências construtivas); qualquer dos acontecimentos seguintes pode ocorrer com igual probabilidade durante a vida útil de uma barragem.

2.4.3 - Acidentes em barragem

Cada barragem tem a sua própria dinâmica, em função da topografia da bacia hidrográfica onde está integrada e onde as vertentes, fluxos de água e erosão se comportam de formas diferentes e com este tópico não se pretende fazer um levantamento exaustivo dos acidentes ocorridos em barragens, mas somente apresentar uma pequena amostra de casos representativos da gravidade de um acidente desta natureza com origem em problemas estruturais ou nas encostas da albufeira das barragens que pela sua instabilidade leva acidentes graves, envolvendo em geral prejuízos muito avultados e perdas de vidas humanas. Um exemplo de rotura de uma barragem, possivelmente o primeiro grande acidente deste tipo relatado na literatura, é documentado por (History.com, 2009). Um grande acidente ocorreu há 130 anos, a 1 de junho de 1889, a montante da cidade de Johnstown, na Pennsylvania, EUA. Numa investigação realizada por (Coleman et al., 2016) analisaram-se os indícios do acidente que levou á rotura de uma barragem de terra que gerou uma onda de cheia que se propagou com uma altura de mais de 10 m e a uma velocidade de 15 m/s em direção à cidade de Johnstown localizada 20km a jusante da barragem (figura 15).



Figura 15: Cidade de Johnstown antes da rotura da barragem (History.com, 2009)

Este acidente provocou mais de 2200 vítimas, com milhares de outras a perderem todos os bens que possuíam. As figuras 15 e 16 realçam a beleza da cidade antes do acidente e posteriormente mostra o estado em que a cidade ficou após a passagem da onda de cheia resultante da rotura da barragem (figura13).



Figura 16: Cidade de Johnstown após a passagem da onda de cheia. (History.com, 2009)

Mais tarde, a 12 de março de 1928, ocorreu a rotura da barragem de St. Francis (figuras 17 e 18), perto de Los Angeles, Califórnia, EUA, tendo vitimado 600 pessoas (Waltham, 2018). O enchimento da albufeira desta barragem teve início em 1 de março de 1926, verificando-se as primeiras infiltrações cerca de um mês depois (no início de abril), quando o nível da água atingiu a área de uma falha inativa localizada no encontro ocidental da barragem (figura 17).



Figura 17: Barragem de St. Francis vista frontal da barragem (Bressan, 2010)

A 7 de março de 1928, com o nível da água já muito próximo da base do descarregador de cheias, foram detetadas várias fendas e infiltrações em ambos os encontros da barragem. A rotura da barragem ocorreu cinco dias depois, gerando uma onda com cerca de 43 m de altura que se propagou para jusante,

atingindo cinco minutos após a rotura uma infraestrutura situada a 2.4 km, com uma velocidade de 29 km/h e uma altura de 37 m, vitimando 64 trabalhadores, como descrito por Waltham (Waltham, 2018). Apenas 60 metros de secção central da barragem permaneceram “de pé” após o esvaziamento da albufeira (figura 18).



Figura 18: Barragem de St. Francis restos da barragem após o acidente. (Bressan, 2010)

Posteriormente, em 1959, ocorreu a rotura de uma barragem construída entre 1952 e 1954 no rio Reyran, França, a 7 km a norte de Fréjus, na Riviera Francesa (Côte d’Azur). A barragem de Malpasset, como ficou conhecida, tinha como principais objetivos o abastecimento de água a povoações e a irrigação dos campos da região.

Com referem fontes da época segundo a referência de um jornal local (Ricketts, 2012), pouco depois das 21 horas de 2 de dezembro de 1959 a barragem de Malpasset literalmente ‘explodiu’, descarregando 50 milhões de m³ de água que geraram, na fase inicial, uma onda com 50 m de altura e a propagar-se com uma velocidade de 70 km/h. Essa onda transportou consigo enormes pedaços de blocos de betão pelo vale a jusante, parte deles com 600 toneladas. Alguns desses blocos podem ser vistos ao longo da autoestrada, a mais de um quilómetro da sua localização inicial. Poucos minutos após o colapso, 53 casas haviam sido destruídas provocando 120 mortes, somente no vale do Reyran. Sete minutos após a rotura da barragem a onda de cheia e lamas atingiram a parte ocidental da cidade de Fréjus. Cerca das 21h40m, menos de 30 minutos após o colapso da barragem, a onda de cheia atingiu o mar, com apenas dois metros de altura, mas com uma capacidade de transporte suficiente para arrastar consigo seis aviões do aeroporto naval. Foram contabilizadas 423 vítimas, entre as quais 135 crianças. A figura 19 mostra uma imagem recente da secção do vale onde se localizava a barragem de Malpasset.



Figura 19: Local da barragem de Malpasset posteriormente ao acidente (Paris Match 2019)

Pelas 22h38m do dia 9 de outubro de 1963 ocorreu o deslizamento de uma encosta da albufeira de uma barragem construída no rio Vajont (figura 20), Itália. A massa desmoronada, com um volume superior a 2.35×10^8 m³, caiu de uma altura de cerca de 175 m, e preencheu parte da albufeira numa extensão superior a 2500m.

Relatos da época estimaram o tempo de ocorrência do desmoronamento entre 15s e 30s. A massa sólida desmoronada bloqueou completamente o vale e subiu até uma altura de 140 m na margem oposta. Na altura, a albufeira continha 115 milhões de metros cúbicos de água. A massa de água contida na albufeira foi empurrada para a margem oposta, destruindo a aldeia de Casso, situada 260 m acima do nível da albufeira, antes de galgar a barragem de betão em abobada de dupla curvatura gerando uma onda que avançou para jusante com uma altura superior a 70 m. Esta enorme massa de água, com um volume de cerca de 30 milhões de metros cúbicos, atingiu as aldeias de Longarone, Pirago, Villanova, Rivalta e Fae, destruindo-as completamente.

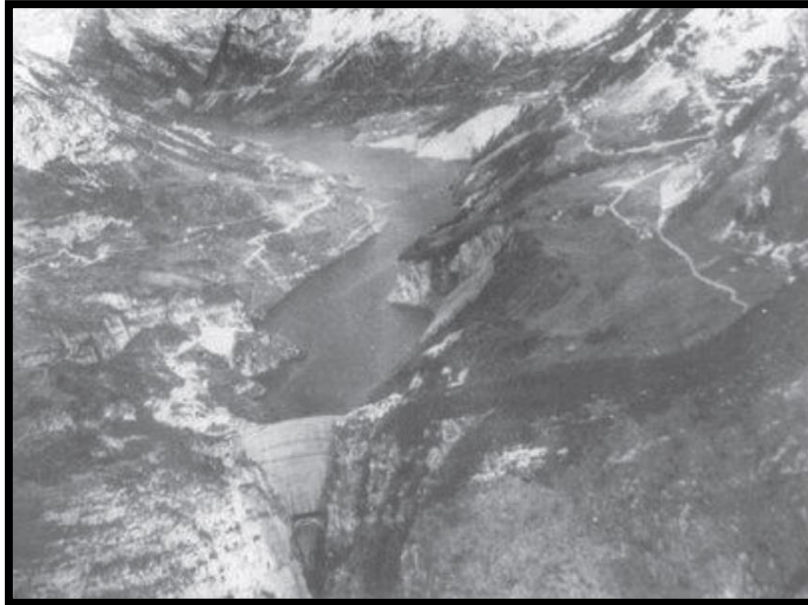


Figura 20: Barragem de Vajont vista antes do acidente (Dave Petly, 2013)

Neste acidente perderam-se cerca de 2500 vidas. A Figura seguinte mostra a barragem e as margens da albufeira antes e após o deslizamento da encosta conforme (Dave Petly, 2013). Apesar da enorme sobrecarga a que foi sujeita, a barragem não foi destruída e ainda hoje permanece no local, funcionando como muro de suporte da massa sólida que preencheu a albufeira (figuras 20 e 21).



Figura 21: Barragem de Vajont após o deslizamento da encosta.

2.4.4 - O que pode inviabilizar uma barragem

Barragens com grandes reservatórios de água são frequentemente encontrados em regiões montanhosas ou terras altas, geralmente em vales ou desfiladeiros estreitos (Figura 22). As encostas das montanhas são geralmente suscetíveis a deslizamentos de massas, incluindo movimentos de rochas. Existem casos de deslizamentos de terra em albufeiras, gerando ondas de impulso sobre a barragem, com consequências catastróficas a jusante. Isso inclui a tragédia da barragem de Vajont em 1963. Segundo (Heller et al., 2009) o processo geral que descreve esses eventos foi agrupado em três fases (1) impacto da massa de terra e rochas com a geração de ondas; (2) propagação de ondas com transformação de ondas; e (3) aceleração da onda de impulso e galgamento da barragem (Figura 20). No entanto, uma barragem não será coberta se a altura de subida das ondas for menor que a folga f (figura 23), a diferença de altitude entre o coroamento da barragem e o nível da água da albufeira, quando o deslizamento de massas colidir com a água da albufeira. Ainda assim, as encostas montanhosas ao redor de uma albufeira (figura 22) representam uma ameaça à segurança da barragem. Consequentemente, estimar o risco associado a ondas de movimentos de massas sobre uma barragem é importante. Nessa avaliação, as configurações da albufeira, a geologia e a topografia, são importantes.

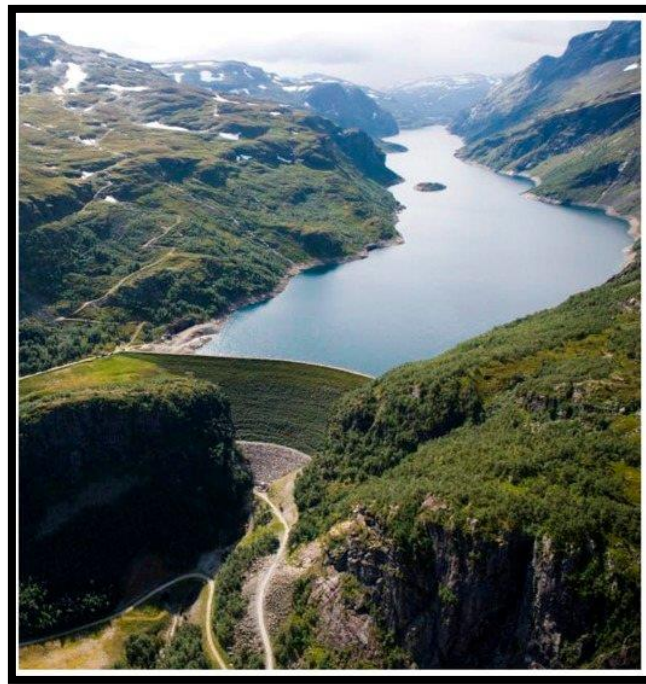


Figura 22: Albufeira de barragem in Aurland Municipality Norway (Tessema et al., 2019)

A forma da albufeira (altura) num vale estreito em montanha é muitas vezes maior que sua largura (Figura 22) e, portanto, muito suscetível a um potencial movimento de massas pelas encostas ao longo do comprimento da albufeira, aproximadamente perpendicular ao eixo longitudinal desta.

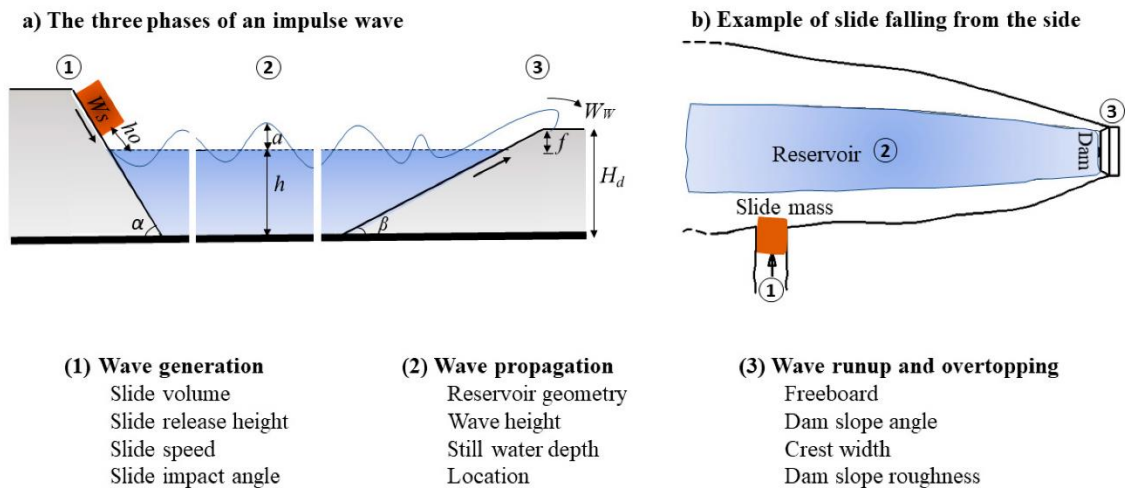


Figura 23: As três fases das ondas geradas por deslizamentos de terra com os parâmetros relevantes para este estudo: (1) impacto da massa de terra e rochas com a geração de ondas; (2) propagação de ondas com transformação de ondas; e (3) aceleração da onda de impulso e galgamento da barragem (Tessema et al., 2019).

Estão disponíveis numerosos estudos experimentais e numéricos sobre ondas geradas por deslizamentos de terra. Muitos deles foram realizados em calhas para investigar propriedades bidimensionais (2D), enquanto outros estudos investigaram os efeitos tridimensionais (3D) de tsunamis gerados por deslizamentos de terra, considerando amplos reservatórios (corpos de água 3D), bem como várias geometrias, como praias e ilhas planas. Esses estudos incluem deslizamentos de terra modelados com material granular e rochoso e investigações sobre o efeito de diferentes parâmetros de deslizamentos de terra, como geometria e energia de deslizamentos de terra, na onda gerada. Um estudo recente e relevante de (Evers, 2017) que investigou, por exemplo, o efeito da velocidade do impacto da lâmina, massa da lâmina, ângulo do impacto da lâmina, largura da lâmina e profundidade da água parada em modelos 2D e 3D. (Evers, 2017) descobriu que, para a mesma massa de deslizamento (volume), a geração de ondas é influenciada pela geometria do deslizamento de terra, com um deslizamento de terra mais amplo gerando ondas maiores. Além disso, ele descobriu que a amplitude e a forma da onda inicial são influenciadas pelo ângulo de impacto da lâmina como demonstrado na figura seguinte.

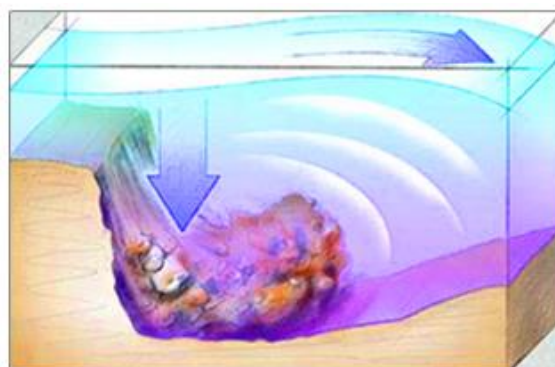


Figura 24: Esquema de movimento de massas no interior de um reservatório (Weather Wiz Kids, 2021)

Apenas alguns estudos consideram o galgamento de barragens (Fase 3 nas figuras 23 e 25) e incluem fórmulas para o volume de galgamento com base nos parâmetros de onda e barragem. Esses estudos são principalmente os de (Huber et al., 2017) no caso de um modelo de barragem granular erodível, e (Kobel et al., 2017), no caso de um modelo de barragem sólido e não erodível. A fórmula resultante para o volume de galgamento é baseada em testes experimentais (2D). (Kobel et al., 2017) usaram canais prismáticos retangulares de ondas de água com ondas solitárias propagando-se diretamente em direção a uma barragem (configuração semelhante à mostrada na Figura 25b), simulando ondas geradas por um movimento de massas que colide com uma extremidade do reservatório diretamente em direção à barragem. (Kobel et al., 2017) apontam que o tipo de onda solitária representa um caso extremo.

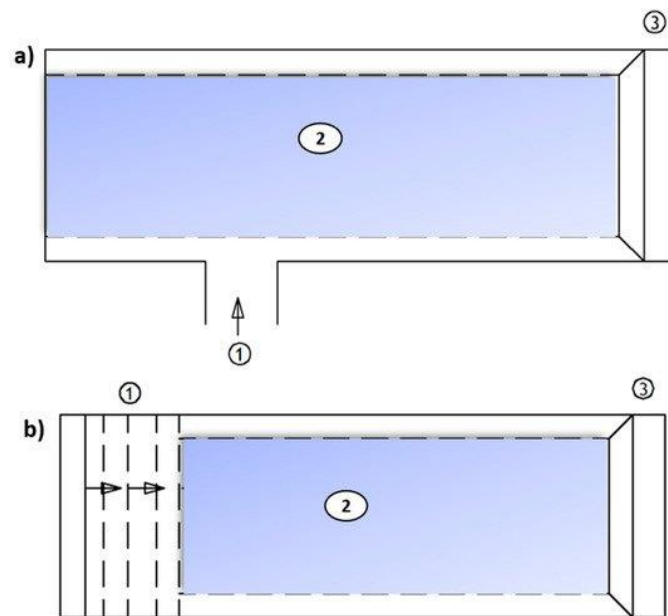


Figura 25: Aspecto geral do impacto do deslizamento num reservatório: 1 é a zona de impacto do deslizamento, 2 é a zona de propagação de ondas e 3 a zona de subida da onda pela barragem (a) escorregamento do lado de um desfiladeiro; (b) onda solitária.

2.5 Detecção e monitorização de instabilidades

Existe atualmente uma oferta significativa de possibilidades para fazer a deteção e controlo de locais potencialmente instáveis. Alguns deles permitem a sua observação à distância como o caso de observações por satélite, InSar (Rosalind L. Helz, 2005), ou também radar terrestre, onde são utilizadas ondas de som para medição de distâncias, ou ainda por tecnologia LIDAR (Stoker et al., 2016), como laser scanner terrestre ou aerotransportado onde é utilizado um feixe laser para medição de distâncias. Estes tipos de campanhas são geralmente muito dispendiosas tanto pela utilização de equipamentos muito específicos e complexos como pelos recursos humanos. Existem também soluções mais localizadas como instalação de instrumentação geotécnica e topográfica, mas este tipo de aparelhagem

geralmente só é instalada quando são detetadas instabilidades e permitem estudar o deslocamento de massas com precisões milimétricas.

Uma vez que ambas as soluções apresentadas denotam limitações consideráveis, uma ao nível da precisão e fiabilidade dos dados e outra a limitação ao nível da área de cobertura abrangida pela observação, estas deveriam ser combinadas de forma a otimizar as potencialidades e fiabilidade de cada tecnologia.

Quando existe uma infraestrutura/estrutura (albufeira, lago, rio, porto, etc.) localizada num determinado local onde à partida se conheça à que existe um risco, ainda que diminuto, de movimento de massas, deveriam ser programadas campanhas com frequências estabelecidas recorrendo a técnicas com uma grande cobertura do solo (LIDAR/Radar) para deteção de potenciais problemas e quando estes sejam detetadas, nesse caso, a implantação de campanhas mais localizadas com tecnologia com maior precisão (geotecnia/topografia).

Ora quando estas massas se encontram fora da superfície coberta pela água, a sua deteção torna-se mais facilitada, uma vez que o terreno é visível e de fácil acesso para estudo. Isto não se verifica em zonas submersas onde não existe acesso facilitado nem tão pouco é visível o que dificulta bastante a monitorização de potenciais zonas instáveis.

2.5.1 - Instabilidades Emersas

Existem ocorrências como erosão e movimentos de massas que são considerados fenómenos naturais que ocorrem por ação dos elementos da natureza e que acontecem de forma natural. Estas ocorrências, podem, no entanto, ser potenciadas por ações antrópicas e que quando se desenvolvem em zonas emersas, são facilmente detetáveis e rapidamente se podem desenvolver ações para mitigar o seu desenvolvimento de forma a evitar acidentes. Estas ações incluem sistemas de monitorização geotécnica que permitem um estudo pormenorizado de elevada precisão de forma a estudar a evolução das instabilidades. De entre as várias opções de instrumentação encontram-se os extensómetros, que permitem a medição de extensões ou compressões no terreno, inclinómetros, que permitem medir deslocamentos planimétricos em profundidade, os piezómetros, que permitem medir o nível piezométrico, antenas GNSS que permitem medir deslocamentos superficiais em 3D, os clinómetros, onde são observadas as variações de inclinação do solo, as linhas de assentamento que permitem acompanhar os assentamentos/empolamentos ao longo de um alinhamento semi-profundo, as linhas de nivelamento geométrico que permitem medir assentamentos/empolamentos superficiais, e ainda outros instrumentos que deverão ser estudados com pormenor em função das patologias detetadas.

Um caso recente onde foi notória a falta de instrumentação e a falta de investimento no controlo e observação de estruturas emersas foi o do colapso de uma barragem de rejeitados (G1 Minas, 2019) no

estado de Minas Gerais no Brasil e onde provocou vários mortos e desaparecidos, bem como uma vasta destruição no percurso da onda de lamas.

Com a tecnologia a evoluir cada vez mais, existem atualmente variadíssimas possibilidades para realizar campanhas de estudo de estabilidade de vertentes, mas que poderão atingir custos que muitas vezes não podem ser suportados pela entidade exploradora da infraestrutura.

Não raras vezes, estes locais são quase inacessíveis e localizados em zonas remotas que dificulta toda a logística necessária para as campanhas de observação.

Técnicas como o LIDAR ou InSAR já permitem realizar observações a partir de plataformas aéreas como satélites, aviões ou helicópteros (figura 26) com precisões a rondar alguns centímetros o que é perfeitamente aceitável para deteção atempada de anomalias no terreno.

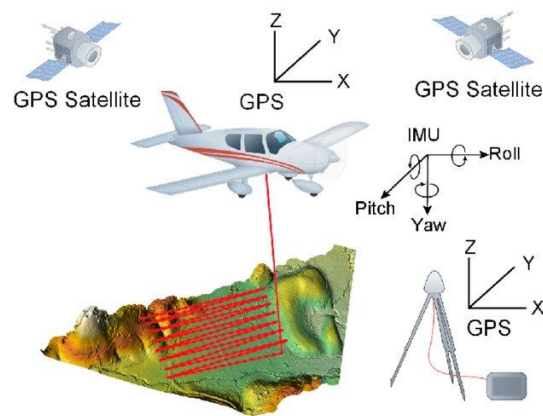


Figura 26: Levantamento topográfico com tecnologia LIDAR em avião (Shih et al., 2008)

A evolução tão acelerada nos últimos anos, e com o aparecimento dos primeiros VANT (veículos aéreos não tripulados) surgiu então a oportunidade de fazer acoplar cameras de alta resolução e Laser Scanners para fotogrametria e realização de nuvens de pontos de alta resolução (figura 27), de forma a reduzir custos logísticos muito dispendiosos até aos dias de hoje.

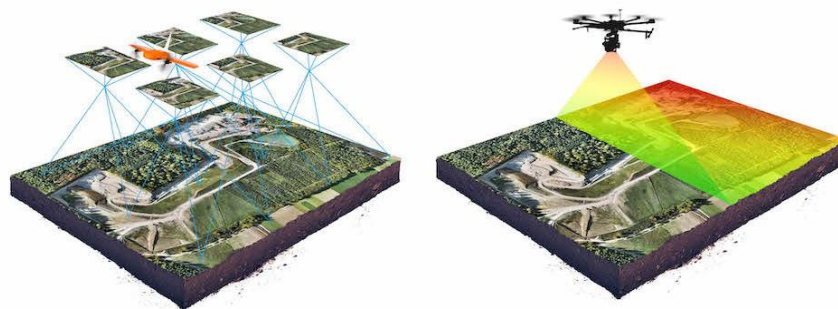
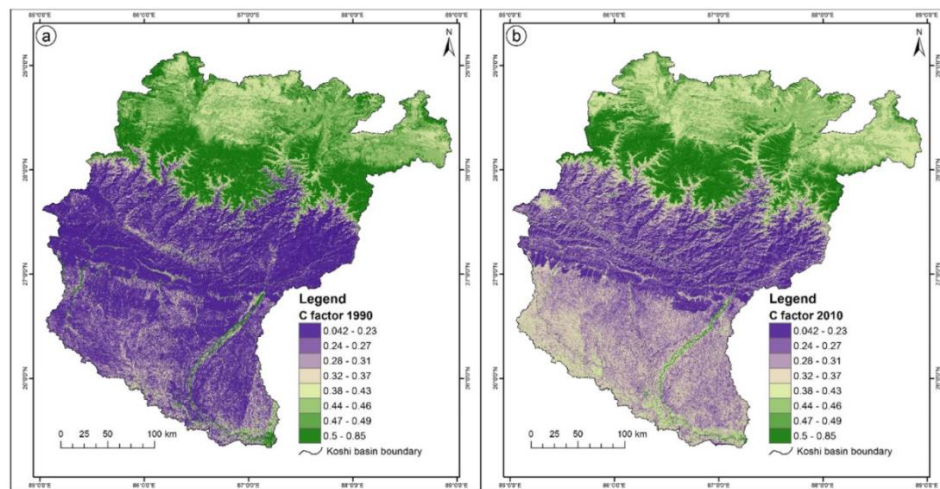


Figura 27: Fotogrametria e Laser Scanning com recurso a VANT (Wingtra, 2021)

Novos desenvolvimentos na detecção remota significam que, num futuro próximo, a ocorrência de erosão, controlada por radar ou fotografia de alta resolução, possa ser exequível (figura 28) onde é analisada a cobertura do solo recorrendo a detecção remota.



doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150494.g004>

Figura 28: Fator da distribuição espacial da cobertura do solo.

Para análise da superfície de solo submersa existem outras soluções como veículos aquáticos equipados com sensores cujos dados depois de processados permitem realizar um levantamento batimétrico de precisão (cm).

2.5.2 - Instabilidades Imersas

Os fenómenos de erosão ou movimentos de massas em zonas submersas, têm uma baixa probabilidade de serem detetados num estado ainda precoce do seu desenvolvimento uma vez que não se encontra visível. Na grande maioria dos casos, estas ocorrências só são detetadas quando os danos são já irreversíveis.

Para responder a este problema, a tecnologia desenvolveu-se no sentido ser possível monitorizar estes ambientes de forma a garantir a segurança de pessoas e bens, bem como ser possível fazer uma caracterização morfológica de fundos subaquáticos e acompanhar a sua evolução e assim detetar potenciais anomalias.

2.5.2.1 - Caracterização morfológica subaquática

Para o estudo e controlo de erosão e sedimentação em zonas subaquáticas recorre-se a técnicas de alguma complexidade devido às dificuldades de acesso a determinadas zonas. Uma das técnicas adotadas é a batimetria que consiste num levantamento topográfico detalhado de uma zona submersa.

Esta técnica baseia-se na medição de zonas submersas por métodos indiretos, um sensor ativo efetua medições para o fundo aquático para assim ser possível fazer o levantamento topográfico nas zonas inundadas. Assim, este método é ainda o mais eficaz uma vez que ainda não existe outro tipo de instrumentação com eficácia para medição de fundos aquáticos, sendo então que a monitorização de zonas deste tipo se baseie essencialmente na caracterização morfológica.

O levantamento batimétrico é a técnica utilizada para medir a profundidade de lagos, rios, barragens e oceanos, representado em cartografia com curvas de nível que ligam pontos de igual profundidade. Com ela é possível obter informações a referentes do relevo, forma e textura desses ambientes.

Os resultados obtidos a partir desta técnica são importantes para diversas áreas. Por exemplo, para a agricultura ou energia, esse tipo de levantamento é determinante para ter um controlo mais preciso sobre barragens, a capacidade de armazenamento de água e processos erosivos. Também é fundamental para monitorização dos fundos de portos e canais navegáveis uma vez que a segurança das embarcações implica que as zonas estejam livres de obstáculos e conseguir assim uma boa eficiência no tráfego de embarcações.

A batimetria pode ser relevante em estudos oceanográficos, hidrográficos e até mesmo de âmbito arqueológico em zonas inundadas. Pode ser utilizada ainda para apoiar atividades como perfurações de poços subterrâneos, sondagens e estacas-cravadas.

Os levantamentos batimétricos podem ser utilizados para uma grande variedade de trabalhos no estudo do terreno submerso e podem ser eles:

- Mineração;
- Centrais Hidrelétricas;
- Infraestruturas portuárias;
- Infraestrutura rodoviária;
- Infraestrutura ferroviária;
- Navegação marítima.

As áreas de atuação para projetos de batimetria podem ser:

- Batimetria de reservatórios;
- Batimetria de rios, Lagos e canais;
- Batimetria de barragens/albufeiras.

Estas atuações permitirão realizar as seguintes atividades:

- Atualização de cota, área e volume;
- Controlo de assoreamento;
- Levantamento de máxima cheia;
- Volume de água e sedimentos;
- Levantamento prévio de barragens;
- Atualização do escoamento livre;
- Atualização para estudos de rotura de barragens.

Os equipamentos existentes com capacidade de realizar levantamentos batimétricos são hoje de elevada precisão e com capacidade de medição indireta de distâncias.

Tecnologias como LIDAR com laser verde e sonar são tecnologias que permitem um alto rendimento de levantamentos batimétricos e com alcances que permitem a medição na grande maioria dos locais na Terra.

O LIDAR com laser verde evoluiu a partir do LIDAR convencional com laser vermelho, mas este consegue penetrar na água algumas dezenas de metros de profundidade, sendo que o seu funcionamento em águas com elevada opacidade, devido a partículas em suspensão na água, é bastante limitado uma vez que o feixe laser não consegue penetrar na coluna de água e assim inviabilizando a utilização desta técnica para locais com estas características. Este equipamento pode assim ser equipado numa plataforma aérea (Adams et al., 1986) e realizar levantamentos terrestres e subaquáticos em simultâneo (Fugro, 2022) não sendo para isso necessário despende de uma campanha adicional para completar os levantamentos terrestres ou batimétricos o que encarece de forma substancial o custo dos projetos.

A utilização do sonar, tanto de feixe simples como multi-feixe, é largamente utilizado para levantamentos batimétricos devido à sua elevada precisão, tendo no entanto de ser equipados em embarcações com tripulação uma vez que constituem uma massa considerável e de difícil portabilidade, sendo que nos últimos anos estão a ser desenvolvidas ecosondas de elevada precisão (<10cm) e que podem ser equipadas em veículos não tripulados (EchoLogger, 2022).

Este trabalho faz-se normalmente recorrendo a uma embarcação com uma tripulação especializada no trabalho a desenvolver e com equipamentos para fazer a medição dos fundos (figura 29).



Figura 29: Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa em campanha de levantamento batimétrico.

Este tipo de campanhas acarreta sempre custos muito elevados devido à logística necessária, embarcação utilizada e equipamentos embarcados para realização das medições.

Para os levantamentos batimétricos, podem ser utilizados diferentes tipos de equipamentos baseados em tecnologias diferentes. Equipamentos sonar, que poderão ser de feixe simples ou multifeixe, e equipamentos LIDAR. Os sonares de feixe simples apenas permitem a medição de um único ponto por observação, enquanto os sonares de multifeixe permitem a medição simultânea de centenas de pontos. A logística necessária para transportar estes sonares também obriga a abordagens diferentes, sendo o sonar de feixe simples de transporte menos complexo devido à simplicidade do sistema.

O sonar de multifeixe obriga a um transporte de dimensões consideráveis, não permitindo assim a utilização de uma pequena embarcação do tipo insuflável ou semirrígido.

Para a utilização destas técnicas é necessário recolher informação complementar para posteriormente calibrar os resultados em função da temperatura, turbidez e salinidade da água, uma vez que estes fatores influenciam a propagação das ondas ao longo da coluna de água o que provoca o retardamento/aceleração dos sinais influenciando assim a distância medida. Para a medição destes fatores é utilizado um perfilador acústico (MRA, 2022) utilizado para medição do perfil de velocidade do som para corrigir o comportamento do som em toda a coluna de água.

Existem, no entanto, desenvolvimentos tecnológicos que permitem a construção e operação de veículos autónomos não tripulados. É o caso da Marinha Portuguesa que desenvolveu um veículo não tripulado com navegação autónoma que poderá ser empenhado em missões de cariz militar, ambiente ou busca e salvamento marítimo, como é o exemplo do caso do acidente numa pedreira em Borba onde esta tecnologia foi empenhada pela Marinha Portuguesa (Carlos Freire, 2018).

2.5.2.2 - Casos de Estudo

Existiram ao longos dos tempos vários casos onde se aproveitou a tecnologia da época para realizar investigações em locais não conhecidos e inacessíveis à época. As novas experiências permitem assim desenvolver técnicas e descobrir novas metodologias para estudar locais inacessíveis como são os casos de Sixmile Creek e do Porto de Setúbal a seguir analisados.

1. Caso de Sixmile Creek

A seguir é analisado um estudo realizado pelo USGS numa albufeira onde ocorreu um deslizamento e foram realizadas campanhas para estudo da evolução da massa que se deslocou para o seu interior.

Durante 2015, o US Geological Survey, em cooperação com a cidade de Ithaca, Nova York e o estado de Nova York Departamento de Estado, realizou um levantamento batimétrico do reservatório inferior de Sixmile Creek, no condado de Tompkins, Nova York (Wernly et al., 2016). Um antigo reservatório de abastecimento de água para a cidade de Ithaca, o reservatório já não é uma infraestrutura funcional do sistema de abastecimento de água de Ithaca, tendo sido substituído por um reservatório maior a menos de um kilometro a montante em 1911. Excessiva sedimentação reduziu substancialmente a capacidade de armazenamento de água do reservatório (figura 30) e obstruiu a comporta do descarregador de fundo da barragem, tornando assim esta infraestrutura inoperável.

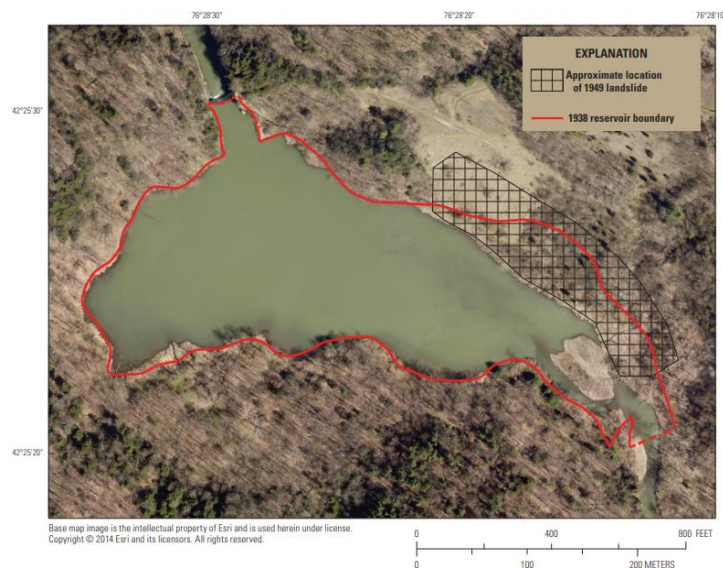


Figura 30: Deslizamento de terras para o interior da albufeira da barragem (Wernly et al., 2016)

A USGS (Wernly et al., 2016) recolheu dados batimétricos usando um perfilador acústico Doppler. Em mais de metade do reservatório, as profundidades foram medidas manualmente devido à interferência no fundo aquático provocado pela vegetação (figura 31).

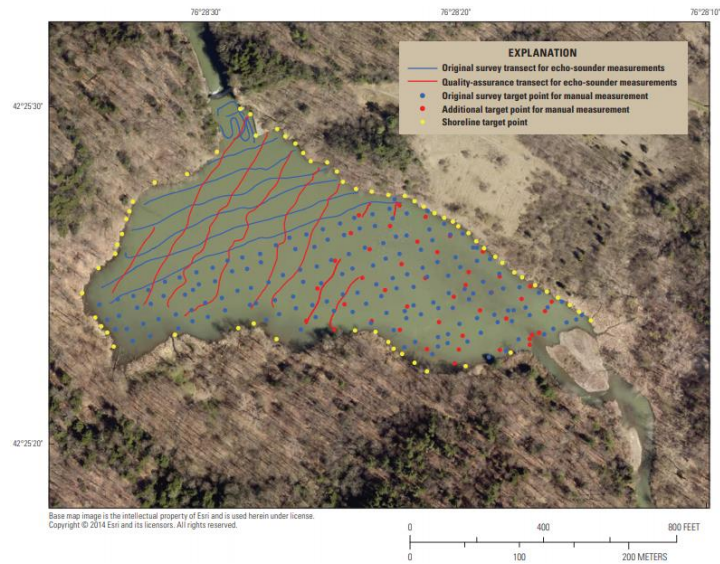


Figura 31: Plano batimétrico para a albufeira (Wernly et al., 2016)

Foi criado um modelo de elevação a partir dos dados das profundidades recolhidas aquando do incidente em 1938, recorrendo a medições manuais e agora comparados com o levantamento realizado pelo USGS (Wernly et al., 2016) tendo concluído que a superfície de sedimentos armazenados aumentou ao longo deste período tendo limitado ainda mais a capacidade de armazenamento de água (figuras 32 e 33).

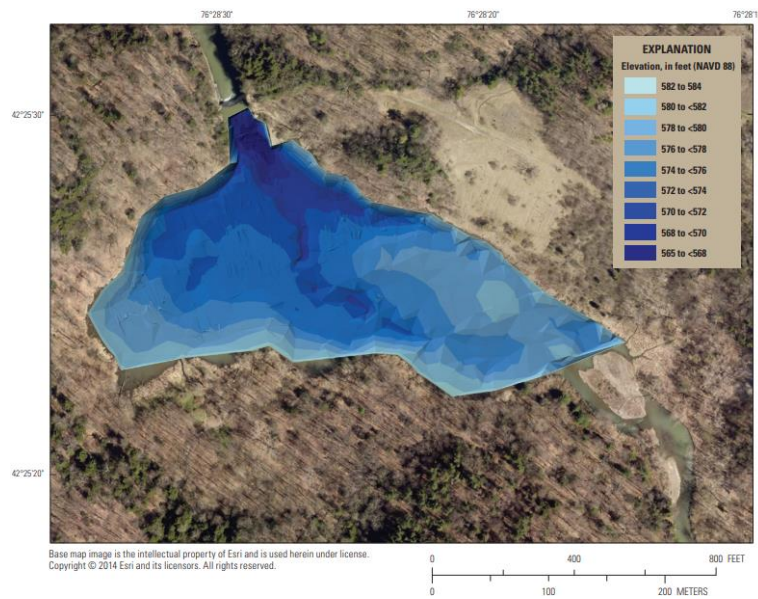


Figura 32: Modelo batimétrico em 2015 (Wernly et al., 2016)

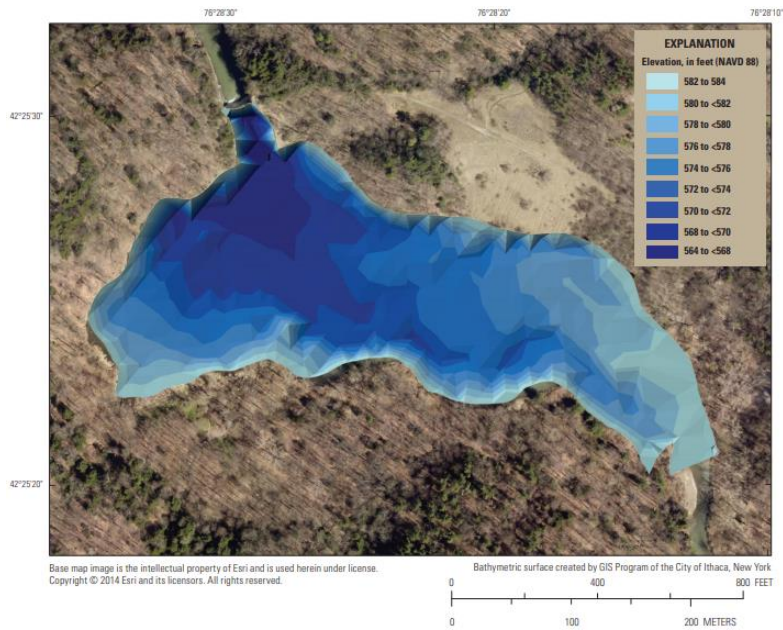


Figura 33: Modelo batimétrico em 1938 (Wernly et al., 2016)

Os resultados indicam que a capacidade original de armazenamento do reservatório no seu pleno armazenamento cobria uma área de cerca de 19.6 acres e esse sedimento acumulado entre 1938 e 2015 diminuiu a capacidade do reservatório para uma superfície de água de 13.9 acres (figura 34). Essa carga de sedimentos é atribuída a processos de erosão anuais da bacia hidrográfica acima do reservatório, bem como de um deslizamento de terra que encheu grande parte do reservatório ao longo da encosta norte em 1949 (Wernly et al., 2016).

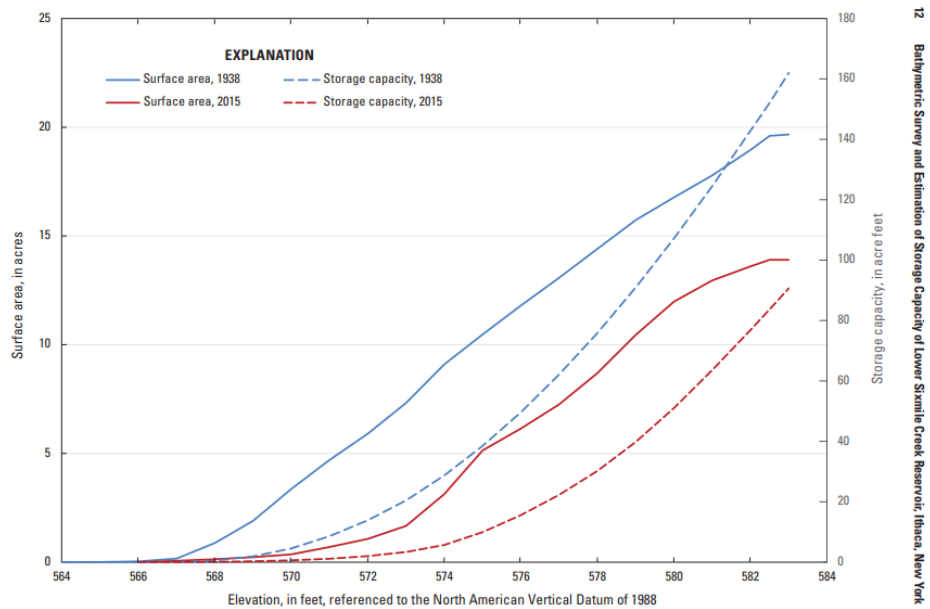


Figura 34: Comparação do levantamento batimétrico e da capacidade de armazenamento em 1938 e 2015 (Wernly et al., 2016)

Com este estudo (Wernly et al., 2016) foi possível verificar que o reservatório foi quase inutilizado para a sua função original e é um exemplo das consequências da instabilidade das vertentes e a falta de controlo/monitorização da erosão a montante das albufeiras ou corpos de água. A preocupação com a sua conservação desde cedo foi considerada pelos serviços da cidade de Ithaca realizando levantamentos complexos para a época e hoje aproveitados para os cálculos dos volumes ocupados pelos deslizamentos e deposição de sedimentos.

A importância de um seguimento contínuo em reservatórios é assim confirmada com este trabalho o que revela que caso existissem trabalhos de acompanhamento das vertentes poderia ter sido evitado tal desfecho e o reservatório ser ainda utilizado na sua plena capacidade.

Com um sistema de informação geográfica o seguimento contínuo deste tipo de trabalhos torna-se mais completo com uma ferramenta com capacidade de realizar análises em 2D e 3D e neste caso poderiam ter sido realizadas análises hidrológicas que poderiam ter ajudado na mitigação de alguns dos problemas ocorridos tal como efetuar simulações para uma melhor compreensão do comportamento dos solos no reservatório.

2. Caso do Porto de Setúbal

Uma atividade desenvolvida pela (Porto de Setúbal - APSS, 2002) - Administração dos Portos de Setúbal e Sesimbra - numa área ambientalmente sensível, consistiu na monitorização dos Portos de Setúbal e Sesimbra num contexto de proteção ambiental e desempenho dos navios e embarcações que usufruem do porto. Esta atividade permitiu acompanhar a evolução das condições ambientais nas zonas suscetíveis de serem afetadas pelas atividades portuárias e incidiu de um modo geral na execução da batimetria dos canais de navegação, a hidrodinâmica do estuário e a análise da qualidade da água, dos sedimentos e da componente biológica.

O Plano de Monitorização Ambiental dos Portos de Setúbal e Sesimbra foi desenvolvido de forma contínua e sequencial desde 2002, incidindo sobre a caracterização da evolução de parâmetros ambientais relacionados com o plano de dragagens no porto de Setúbal. O projeto consiste na monitorização da batimetria nos canais da barra, canal Norte e canal Sul (Instituto Hidrográfico).

Posteriormente é feita a caracterização dos processos hidrodinâmicos e de assoreamento após a realização de dragagens, que permitam otimizar essas intervenções, através de um modelo do Estuário do Sado para avaliação das condições hidrodinâmicas e de transporte de sedimentos.

O levantamento topográfico, demonstrado nas figuras 35, 36 e 37, é imprescindível para o estudo do estuário, erosão ou assoreamento dos canais e análise de impacto ambiental. Com base nos dados resultantes das campanhas de medição efetuadas, foram criados modelos digitais do terreno para o traçado de linhas iso-batimétricas e para comparação com as fiadas de verificação.

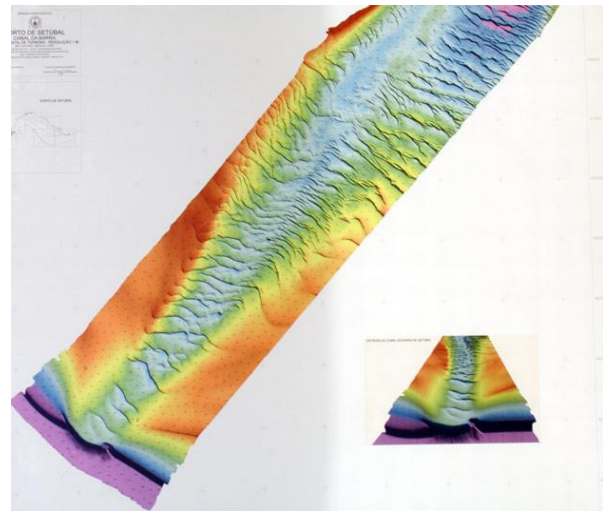


Figura 35: Levantamento batimétrico do Canal na Barra (Porto de Setúbal - APSS, 2002)

Atualmente a realização de dragagens de manutenção é essencial para garantir as acessibilidades marítimas ao porto. Sendo o estuário do Sado uma zona ecologicamente sensível, os trabalhos de dragagens requerem um estudo prévio que minimize os impactos ambientais resultantes. Desta forma, os modelos matemáticos dos processos hidrodinâmicos (gerados pela ação de ondas e correntes) e do transporte de sedimentos no Estuário do Sado (figura 36) surge como uma ferramenta essencial para tomada de decisões.

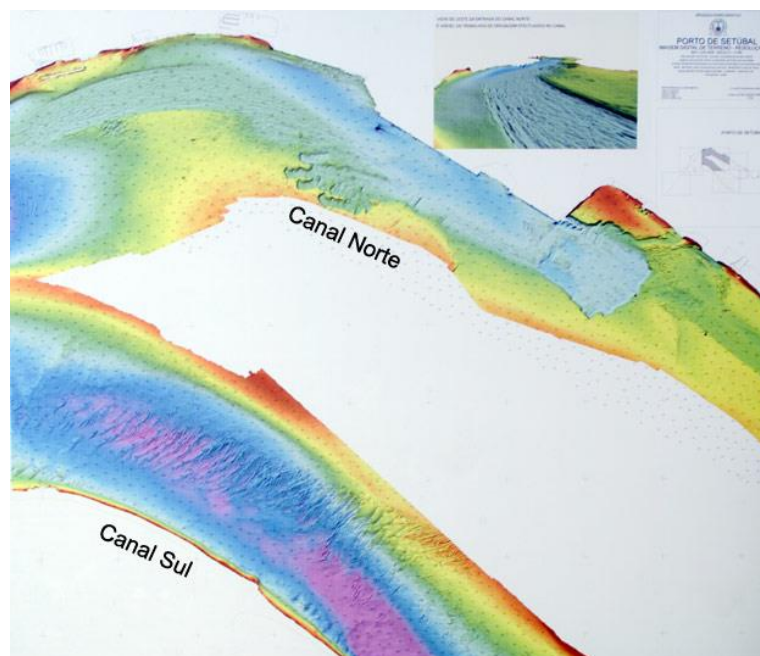


Figura 36: Fundos dos Canais Norte e Sul (Porto de Setúbal - APSS, 2002)

Assim, estas atividades permitem aprofundar o conhecimento dos processos físicos, modelar matematicamente os processos de transporte de sedimentos por arrastamento e em suspensão por ação das ondas e correntes num dado ponto, acompanhamento da evolução da linha de costa na presença de

estruturas marítimas, analisar a sensibilidade à variação dos parâmetros que caracterizam os processos físicos dominantes e permite ainda evidenciar aspetos tridimensionais do escoamento no estuário, que podem desempenhar um papel importante na dinâmica sedimentar (figuras 36 e 37).



Figura 37: Bacia de Rotação das Pirites (Porto de Setúbal - APSS, 2002)

A validação do modelo matemático (suporte físico de todo o sistema de modelação) foi efetuada com base num conjunto de dados de níveis e de maré bastante completos, representativos e convenientemente distribuídos ao longo do estuário. Os dados obtidos permitem assim utilizar o modelo para avaliação de novos traçados dos canais e estabelecer soluções de dragagem.

Cada vez mais existe a necessidade de recolha de informação de forma massiva e cada vez com maior frequência de forma a possuir a informação mais atualizada possível.

Esta logística é cada vez mais facilitada recorrendo a veículos não tripulados e com o avanço tecnológico é possível concentrar toda a aparelhagem e instrumentos em pequenas caixas centralizada com um peso muito reduzido.

2.5.2.3 - Soluções de veículos autónomos para monitorizar zonas imersas

No mercado atual existem já diversas opções de veículos não tripulados com configurações otimizadas para recolha de dados batimétricos, mas que raramente permitem ajustes e alterações à sua configuração por forma a ser adaptado a outros trabalhos. São, no entanto, produtos já bastante desenvolvidos e com qualidade que permitem resultados muito fiáveis tornando-os também muito dispendiosos e que se tornam opções inviáveis para alguns utilizadores potencialmente interessados.

Alguns destes equipamentos têm volume e peso considerável o que dificulta a operacionalidade e a mobilidade destes veículos. O tempo de operação é também um fator relevante uma vez que a maioria dos equipamentos disponíveis no mercado exigem a troca de baterias durante a missão, o que leva a um custo de manutenção das baterias bastante elevado e são poucos os veículos equipados para operar em períodos noturnos.

A seguir descrevem-se algumas opções disponíveis no mercado tornando-se estes exemplos uma referência para o protótipo desenvolvido.

O FoxBathy (Geotresnak, 2019), na figura 38, é um veículo do tipo catamaran, desenvolvido para levantamentos batimétricos em águas mais agitadas que registam alguma ondulação, permite um rendimento de 18 ha/h com uma autonomia de até 5 horas.



Figura 38: FoxBathy ((Geotresnak, 2019))

O veículo ME120 (Oceanalpha, 2019), figura 39, tem um design de catamaran compacto, com 2.5 metros de comprimento e um peso de 150kg. Desenvolvido para conseguir operar em águas mais agitadas, permite transportar sensores e sondas de diversos tipos, podendo obter dados de sonares de diversas tecnologias (feixe simples, multifeixe e varrimento lateral), sonda de qualidade da água e scanner LIDAR.



Figura 39: Hydrographic Unmanned Surface Vehicle ME120 (Oceanalpha, 2019)

O veículo não tripulado Catarob (Subsea-tech, 2019), figura 40, foi desenvolvido para operar em águas interiores, de estilo catamaran com 1.8 metros de comprimento e pesando cerca de 50kg. Este

equipamento permite realizar levantamentos batimétricos e recolha de imagens de vídeo para inspeções aquáticas ou sub-aquáticas.



Figura 40: Drone Catarob (Subsea-tech, 2019)

O Cyberjet 250 (Tecdron, 2019), figura 41, é um veículo desenvolvido para responder a requisitos militares de patrulha aquática transportando cameras à superfície bem como sub-aquáticas, com 2,5 metros de comprimento e um peso de 250kg.



Figura 41: CYBERJET 250 (Tecdron, 2019)

Dos veículos encontrados na pesquisa de mercado 75% baseiam-se numa plataforma de dois cascos, catamaran e apenas um dos exemplos em formato clássico. As razões da escolha desta solução técnica podem passar pela capacidade de carga, facilidade de transporte uma vez que a estrutura catamaran permite desmontar o veículo em peças mais pequenas, mas, possivelmente o fator de maior peso, a estabilidade acrescida deste tipo de embarcação.

A seguir é apresentado um quadro resumo com as especificações de cada veículo.

Tabela 5: Especificações dos Veículos

	FoxBathy	ME120	Catarob	CYBERJET 250
Sistema de Navegação	Automático	Automático	Automático	Automático
Destacável	Sim	-	-	-
Montagem	< 10 minutos	-	-	-
Tempo da bateria	>5 horas	8 horas	-	6h a 12h
Velocidade	2 m/s	2 m/s	2 m/s	3 m/s
Dimensões (mm)	820 x 1130 x 755	2500 x 1400 x 700	1800 x 1000 x 1200	2500 x 1300 x 1200
Peso (Kg)		150	50	250
Telemetria	433-868-933 Mhz	-	-	-
Motor	2	-	-	2
Controlo remoto	Sim (2.4 GHz)	Sim	Sim (2.4 GHz)	Sim
Vídeo (FPV)	Sim (5.8 GHz)	Sim	Sim (5.8 GHz)	Sim
Medição	Eco-sonda mono-frequência	Transdutor automático	Transdutor automático	Transdutor automático
Preço	20730€	-	-	-

2.6 Sistemas de Informação Geográfica e Cartografia de Suscetibilidade a movimentos de massas

Para analisar um grande volume de informação geoespacial é necessário recorrer a sistemas que permitam uma integração de dados analíticos e espaciais de forma a poder ser obtido um resultado à medida do pretendido no projeto em execução.

A conceptualização no espaço surge naturalmente no modo de perceber a realidade e a antiguidade da construção de representações cartográficas é disso uma evidência. O mais antigo vestígio de um mapa data de 3800 a. C., uma placa de argila mesopotâmica representando montanhas, cursos de água e outros objetos passíveis de representação cartográfica (Matos, 208 C.E.). O petróglifo de Bedolina, no Norte de Itália (200 aC. - 1500 dC.) é conhecido como sendo o primeiro esforço de representação de um território habitado. Nesta gravura (*Petróglifo de Bedolina*, 2015) é possível identificar figuras humanas, animais e habitações (figura 42).



Figura 42: Petróglifo de Bedólina (Petróglifo de Bedólina, 2015)

A tecnologia SIG evolui a partir da cartografia temática por via da combinação de crescentes capacidades computacionais, aperfeiçoamento de técnicas analíticas e renovado interesse nos problemas e responsabilidades ambientais e sociais. Neste contexto, as operações de análise espacial, através da sobreposição de temas, permite traçar um limite temporal e identificar a génese das abordagens que, mais tarde, integradas e, novas ferramentas computacionais, viriam a dar lugar ao que hoje designamos como sistemas de informação geográfica. Os primeiros mapas que surgiram com estas características datam de 1800 (figura 42). De acordo com (Longley et al., 2005), as três fases principais ligadas à história dos SIG são a fase da inovação, a fase de comercialização e a fase de exploração que se dão em simultâneo nos EUA, Canadá e Europa.

A origem dos SIG em Portugal, segundo (José & Grancho, 2005), remonta ao início da década de 70 com os primeiros sistemas a serem utilizados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, no Gabinete de área de Sines e na Empresa geral de Fomento, no âmbito de atividades de planeamento e investigação nas Universidades. O crescente apelo e investimento em atividades científicas e de investigação nas universidades e noutras instituições públicas, originou a criação da Junta Nacional de Investigação Científica -JNIC em 1986, tendo sido uma importante força para a utilização dos SIG em Portugal.

Mas o maior impacto deu-se através da criação do Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG) em 1986 (Painho et al., 2006). O SNIG é uma infraestrutura de informação geográfica adequada ao planeamento e gestão dos recursos naturais, à caracterização e conservação do ambiente, ao ordenamento do território e ao planeamento e à gestão de atividades económicas e de natureza social, estando acessível a todos os utilizadores, com a finalidade de proporcionar uma rede de identificação, visualização e exploração de informação geográfica, bem como o acesso a bases de dados temáticas de âmbito nacional, regional e local (Painho et al., 2006). A primeira versão a ser disponibilizada na

internet em 1995, representou um alicerce primordial para a implementação da Diretiva INSPIRE em Portugal.

Com as alterações climáticas a causar fenómenos cada vez mais severos e a provocar alterações profundas na superfície terrestre, os fenómenos de erosão, cheias repentinas e longos períodos de tempo árido são fatores primários para que outros fenómenos possam ocorrer com maior severidade como incêndios, deslizamentos de terras e movimentos de massas junto a corpos de água que podem vir a afetar diretamente e de uma forma catastrófica as populações que habitam em redor de zonas de risco.

Os mapas são ferramentas úteis para a apresentação de informações sobre suscetibilidade a movimentos de massas. Eles podem apresentar vários tipos e combinações de informações em diferentes níveis de detalhe. Mapas de risco usados em conjunto com mapas de uso do solo ou outros mapas temáticos são valiosos instrumentos de planeamento. Geralmente, há uma abordagem em três etapas para cartografia de risco de deslizamento. A primeira fase é a que sintetiza os dados disponíveis e identifica áreas problemáticas em geral. Nesta escala regional (chamada de “pequena escala”), a cartografia é normalmente realizada a partir de uma Pesquisa Geológica. A próxima etapa é a cartografia mais detalhada da superfície e do subsolo, para áreas problemáticas complexas. Por fim, são preparados mapas detalhados em grande escala para localizações específicas. Se os recursos são limitados, pode ser mais prudente ignorar a cartografia em pequena escala e concentrar recursos em áreas mais preocupantes e conhecidas.

Ainda segundo (Highland & Bobrowsky, 2008), os três tipos de mapas de deslizamento mais úteis para planeamento são:

- (1)inventários de movimentos de massas,
- (2)mapas de suscetibilidade ao movimento de massas,
- (3)mapas de risco de movimentos de massas.

Os inventários indicam as áreas identificadas como tendo problemas por processos de movimento. O nível de detalhe desses mapas varia entre inventários de reconhecimento simples, que apenas delineiam grandes áreas onde os deslizamentos parecem ter ocorrido, a inventários complexos, que retratam e classificam cada um dos movimentos e mostram as escarpas, as zonas de erosão do solo e de sedimentação, os deslizamentos ativos e inativos, a idade geológica, a taxa de movimento, e outros dados relevantes sobre a profundidade e natureza dos materiais envolvidos no movimento de massas. Os inventários simples dão uma visão geral da extensão de área da ocorrência de deslizamentos e identificam áreas onde deverão ocorrer estudos mais detalhados. Os inventários mais detalhados fornecem uma melhor compreensão dos diferentes processos de deslizamento numa determinada área e podem ser usados para mitigar o desenvolvimento em zonas sujeitas a deslizamento e ajudar também na implementação de medidas corretivas. Estes inventários são uma boa base para a elaboração de mapas derivados, tais como aqueles que indicam estabilidade de taludes, para classificação do perigo de deslizamento e para a identificação de uso do solo.

Um mapa de suscetibilidade ao deslizamento vai além de um mapa de inventário e descreve as áreas que têm o potencial para deslizamentos. Estas áreas são determinadas por correlação de alguns dos principais fatores que contribuem para os deslizamentos (como encostas íngremes, unidades geológicas frágeis, que perdem a estabilidade quando saturadas ou perturbadas, e rocha ou solo mal drenados) com a distribuição de movimentos de massas no passado. Esses mapas indicam apenas a relativa estabilidade dos taludes; eles não fazem previsões absolutas. Os mapas de suscetibilidade ao deslizamento podem ser considerados derivados de mapas de inventário, porque um inventário é essencial para a preparação de um mapa de suscetibilidade. Por exemplo, a sobreposição de um mapa geológico a um mapa de inventário, que mostre deslizamentos existentes, pode identificar unidades geológicas específicas suscetíveis ao deslizamento. Recorrendo a ferramentas SIG, esta informação pode, então, ser extrapolada para prever outras áreas potenciais de deslizamento. Mapas mais complexos podem incluir informações adicionais, tais como ângulo de inclinação e drenagem.

Utilizando elementos cartográficos referentes às variadas temáticas de representação da terra e cobertura do solo, associados a ferramentas SIG, e combinando todos os dados em análises multicritério para obtenção de resultados que permitam uma análise de suscetibilidade à ocorrência de fenômenos, sendo assim uma ferramenta de excelência para este tipo de trabalhos.

3. Desenvolvimento de Método Integrado de Monitorização e Aviso

Os sistemas de informação geográfica tornaram-se nos dias de hoje uma ferramenta indispensável para qualquer situação de planeamento ou análise de situações que mereçam um acompanhamento em tempo útil.

Neste estudo foi utilizado um sistema de informação geográfica para análise da superfície dos solos com a finalidade de estudar a sua suscetibilidade a movimentos de massas, transporte de sedimentos, estabilidade de vertentes e estudo hidrológico da zona em estudo, recorrendo a imagens de satélites, cartografia temática e outros dados relevantes por forma a identificar zonas críticas ou potencialmente instáveis.

Para o controlo de zonas submersas o sistema de informação geográfica permite realizar uma modelação tridimensional do fundo subaquático recorrendo a plataformas móveis de medição à distância, permitindo assim, pelo método da comparação de modelos tridimensionais e recorrendo a álgebra de mapas, fazer uma deteção de zonas com potencialidade para se tornarem instáveis e assim permitir uma intervenção mais detalhada numa zona bem delimitada.

A batimetria, método de levantamento topográfico de zonas submersas e um dos elementos de maior importância no estudo de solos subaquáticos, é normalmente efetuada recorrendo a embarcações convencionais rígidas ou semirrígidas, ora, isto é uma limitação em zonas pouco profundas, zonas em vales encaixados onde o sinal GNSS é muito débil uma vez que nesses locais a cobertura dos satélites no céu fica obstruída pelas montanhas que constituem os vales. Sendo o posicionamento o fator mais importante na execução da batimetria, é imprescindível que este seja preciso. O posicionamento altimétrico torna-se assim um fator muito relevante na qualidade da batimetria uma vez que a fraca qualidade no posicionamento altimétrico compromete a qualidade dos dados batimétricos.

Em zonas confinadas como canais ou condutas onde é muito difícil, ou em casos mais extremos, impossível a navegação de veículos convencionais, tornando inviável a realização de batimetria. A utilização de sistemas alternativos para estas zonas, como a utilização de veículos não tripulados e utilizando sistemas de navegação locais sem utilização de GNSS, recorrendo a equipamentos de topografia convencionais de última geração como estação total robotizada com prisma 360° para obtenção da localização do veículo de forma contínua recorrendo a técnicas de topografia clássicas.

A frequência com que esses trabalhos são realizados também é diretamente afetada pela logística e custo da operação uma vez que o acompanhamento só será realizado com intervalos longos de tempo e com elevados encargos em recursos.

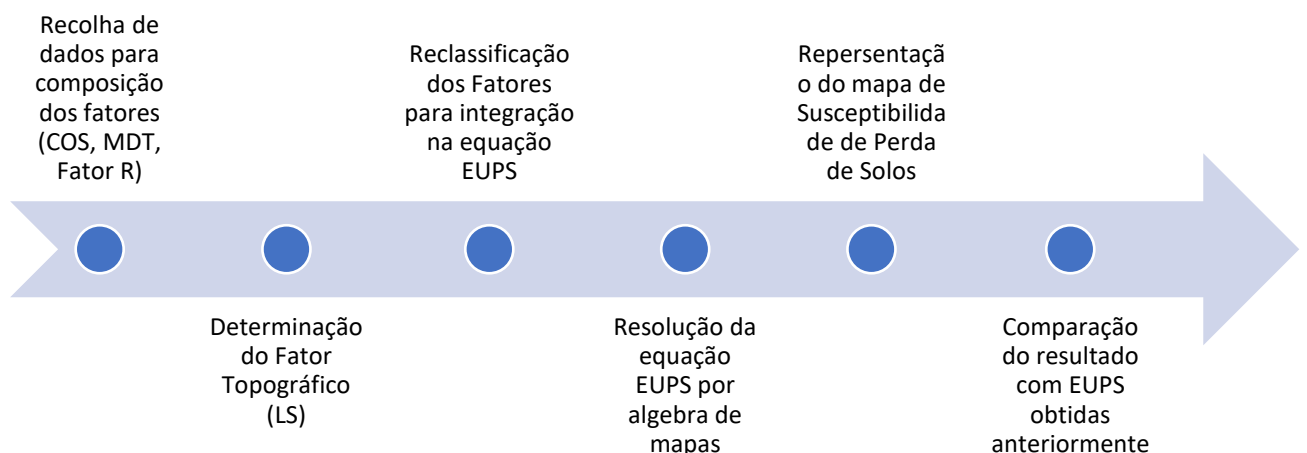
Os veículos não tripulados operados remotamente vêm assim permitir explorar o que em parte é impossível de realizar da forma convencional, permitindo assim obter informação de zonas críticas próximas de obstáculos, locais confinados ou pouco profundos. Assim para ultrapassar estas necessidades pretende-se um veículo não tripulado, com dimensões muito reduzidas, mas com capacidade de carga suficiente para transportar os equipamentos necessários para as operações de batimetria. A autonomia é um dos fatores que mais influencia as operações uma vez que se pretende o maior tempo de atividade possível. Para mitigar este problema o veículo deve ser equipado com painel fotovoltaico para aumentar o período de trabalho útil com o veículo utilizando equipamentos e algoritmos de baixo custo de forma a otimizar a operação

Com a obtenção de um modelo digital de superfície, recorrendo ao SIG, proveniente dos dados adquiridos pelo veículo autónomo e determinando as zonas onde existiram movimentações de sedimentos, é possível relacionar essa informação com os resultados obtidos a partir da perda de solo específico e assim permitir que as zonas submersas possam ser acompanhadas com frequência e que a deteção de anomalias possa ser mitigada.

3.1 Desenvolvimento da metodologia em ambiente SIG

Com este estudo, pretende-se estimar o nível de erosão e transporte de sedimentação na área do Parque Natural da Serra da Estrela, tendo em conta os fenómenos existentes, a ocupação dos solos, a orografia do terreno, ventos e fatores meteorológicos. São analisadas cartas de suscetibilidade a zonas de instabilidade por meio de diferentes fontes e fatores.

Assim, com recurso à Equação Universal de Perda do Solo (EUPS) será possível estimar a localização de zonas críticas e sensíveis à ocorrência de deslocação de solos que possam pôr em causa a estabilidade das vertentes, sendo que o fluxo de trabalho em SIG passa por:



Com variáveis como a erosividade, onde se apresentam os dados para o fator de erosividade do solo para uma determinada quantidade de precipitação, a erodibilidade onde se apresentam os dados para o fator da suscetibilidade do solo à erosão em função da ocupação do solo, o fator topográfico onde identifica o fator que classifica a forma da superfície do solo e também o coberto vegetal onde estão representados os fatores correspondentes a cada classe da ocupação do solo, recorrendo à sobreposição de todos estes mapas, reclassificados com recurso a ferramenta SIG, para a realização da operação segundo as recomendações já citadas anteriormente, é possível determinar um mapa resultante do cálculo de todos os fatores em cada pixel dos mapas utilizados.

A variável para o cálculo do fator topográfico foi determinada recorrendo ao módulo específico da ferramenta SAGA, sendo necessário como variável de entrada, o modelo digital do terreno em estudo e obtendo como resultado o fator topográfico (LS).

Estando reunidos todos os fatores a introduzir na Equação Universal de Perda do Solo, e devidamente reclassificados para assim poderem ser relacionados na equação, é realizada uma operação algébrica para raster de modo a resolver a equação e assim obter o resultado da perda de solo anual para cada pixel do raster.

Este resultado, permite assim obter informação que permite posteriormente determinar a quantidade anual de perda de solo.

Com a informação existente acerca da ocupação dos solos, precipitação, tipo de solos, pendentes, corpos de água (barragens e lagos) será possível aferir o modelo para a estimação de zonas de risco e assim permitir uma ação mais localizada no terreno.

Os documentos e dados recolhidos previamente obedeceram a um critério, de forma a ser possível reunir a maior parte dos fatores que influenciam diretamente a erosão dos solos e transporte de sedimentos.

Uma vez recolhidas todas as variáveis em formato vetorial, procede-se à sua conversão para formato raster para tornar possível a aplicação das equações utilizando álgebra de mapas.

A ferramenta de álgebra de mapas permite a operação algébrica entre ficheiros do tipo raster obedecendo às regras algébricas convencionais da matemática. Isso é possível porque sendo uma imagem constituída por pixels, é possível armazenar um valor correspondente a cada pixel, e ao utilizar os valores dos pixels que espacialmente ocupam o mesmo local, é possível realizar uma operação matemática com os valores desses pixels, resultando num novo pixel com o resultado dessa operação.

Assim, obtém-se um novo ficheiro do tipo raster, com o resultado das operações realizadas, tornando possível visualizar em formato de imagem, o resultado das operações matemáticas.

3.2 Desenvolvimento do veículo autónomo de aquisição de dados

A representação da Terra é um dos processos mais complexos de ser executado na área das ciências geoespaciais devido à complexidade da topografia terrestre não ser possível de representar a realidade num modelo matemático. Existem, no entanto, modelos que se aproximam da realidade e que são utilizados hoje em dia para a sua representação, tal como os modelos de geoide, sistemas de coordenadas e sistemas de projeção.

Desta forma, a representação de zonas submersas é igualmente complexa, mas com a tecnologia atual, é possível realizar levantamentos topo-batimétricos com recurso a veículos não tripulados que transportam os sensores necessários para a aquisição destes dados para obtenção do modelo batimétrico do fundo subaquático.

Para o levantamento batimétrico de zonas inundadas utilizando-se o veículo não tripulado é necessário carregar previamente os detalhes da missão que incluem a zona a percorrer ou em alternativa poderá ser executado em modo manual, onde o operador terá total controlo do veículo.

A montagem dos equipamentos de medição e navegação também deverá ser feita em função das finalidades do projeto. Neste caso, é feito um levantamento batimétrico em medição contínua recorrendo a uma estação total Leica MS50 para efetuar o posicionamento do veículo com elevada precisão, em particular a componente vertical, também em medição contínua acompanhando o veículo de forma automática. De forma a mitigar a perda de sinal para o posicionamento, e por consequência perder a operacionalidade do veículo de forma automática, o equipamento está equipado com 2 antenas GNSS para navegação para que se possa obter a posição do veículo de forma ambígua e não ser perdido o controlo do veículo.

A estação total mede a localização do veículo com coordenadas XYZ, que de seguida são processadas e transformadas para latitude e longitude por microcontrolador pré-programado para o efeito. As coordenadas transformadas são enviadas para a estação terrestre (computador) para serem processadas em software específico para batimetria.

Em paralelo, o veículo que se encontra em operação e a realizar medições, vai enviar as leituras efetuadas pelo sonar para a estação terrestre e são emparelhadas com as localizações obtidas pela estação total a fim de obter uma localização associada a uma profundidade, obtendo assim a informação fundamental para realizar um mapa de profundidades e posteriormente um modelo digital de terreno.

Por forma a aferir os resultados obtidos a partir do sonar é necessário efetuar algumas correções nos posicionamentos medidos devido à posição relativa do veículo. Esta problemática surge uma vez que as correntes, o vento, a ondulação, o erro absoluto de posicionamento por GNSS influenciam o movimento do veículo fazendo por exemplo com que não circule na orientação (*heading*) correta (figura 43).

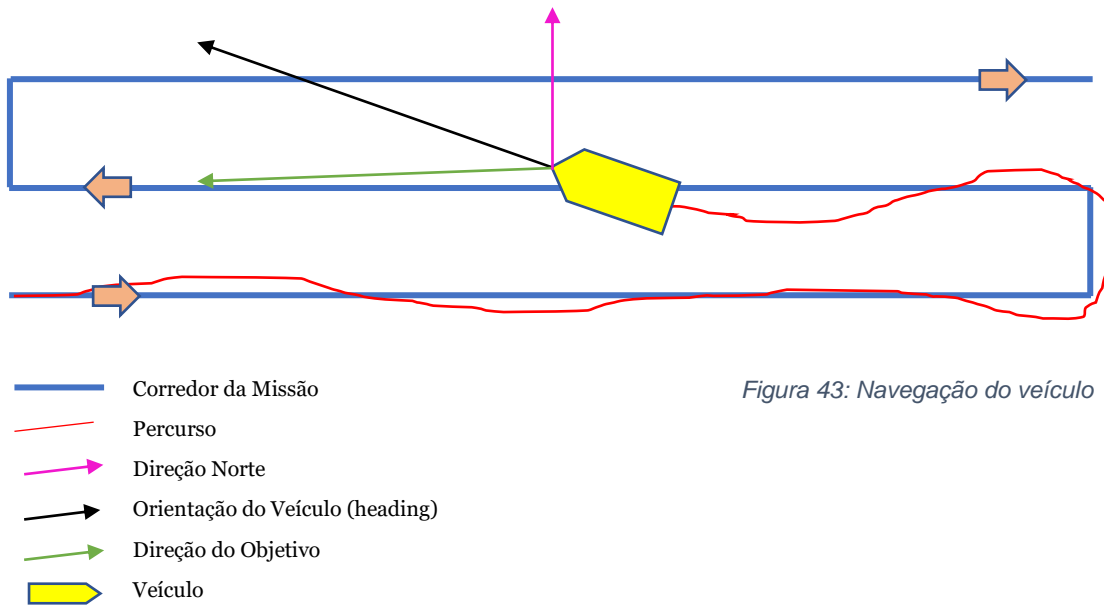


Figura 43: Navegação do veículo

Para além da problemática da orientação do veículo em planta, 2D, como esquematizado na figura 43, existe também o problema de o veículo poder não se encontrar num plano paralelo e coincidente com o plano médio da superfície da água, fazendo com que tenha uma rotação influenciada pela ondulação 3D fazendo assim com que a leitura executada pelo sonar não corresponda ao ponto nadiral do veículo naquele instante (figura 44).

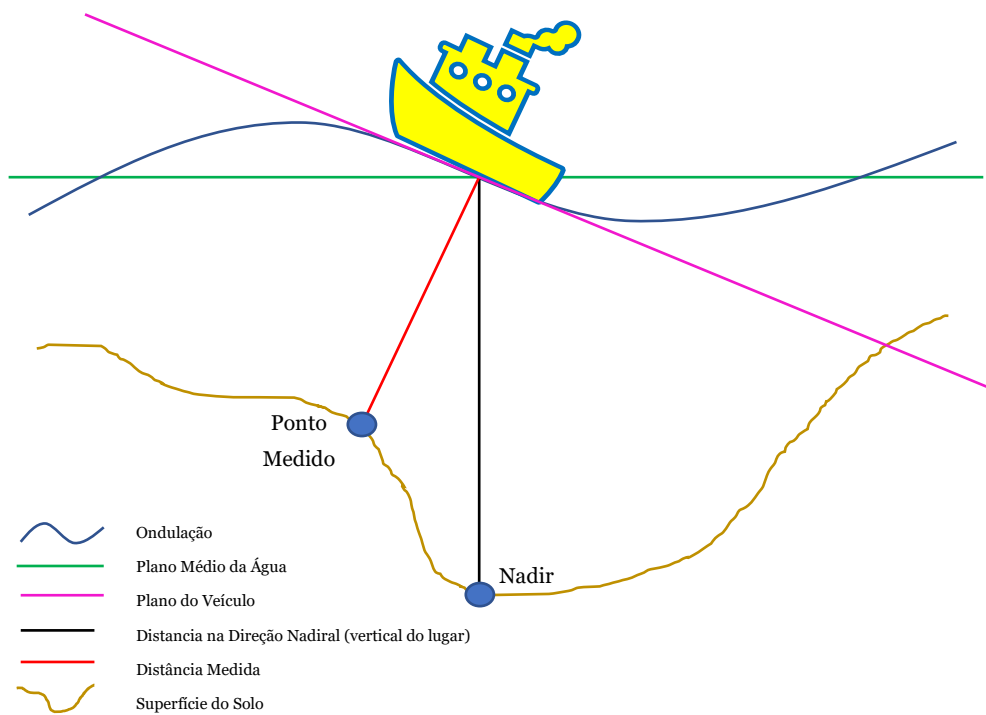


Figura 44: Erro entre a localização do ponto medido e o ponto nadiral devido ao posicionamento do veículo

Deste modo, e recorrendo a cálculos trigonométricos é necessário corrigir o posicionamento do veículo (coordenadas) para a vertical do ponto medido uma vez que a distancia da profundidade difere da distância real na vertical do veículo.

Com os dados recolhidos do IMU, onde são medidos os 3 ângulos direcionais do veículo (yaw, pitch, roll) esquematizados na figura seguinte.

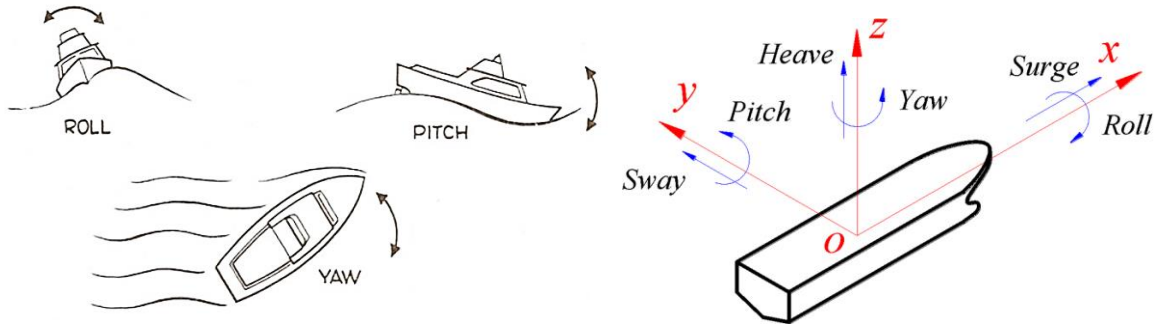


Figura 45: Eixos espaciais do veículo segundo as três direções

Tendo conhecimento de todos os ângulos do posicionamento do veículo (yaw, pitch, roll) é então possível reduzir o erro de posicionamento afeto a esta problemática por meio de rotações e translações recorrendo a cálculo matricial.

Uma vez que os eixos do sistema de referência do veículo (IMU), (figuras 45 diferem do sistema de coordenadas utilizado (WGS84 UTM), (figura 47) é necessário efetuar uma rotação para fazer coincidir os eixos, XYZ, isto porque aquando da deslocação do veículo, o sistema de referência deste, considera-se movel e variável e que poderá não coincidir com o referencial do sistema de coordenadas UTM (figura 46).

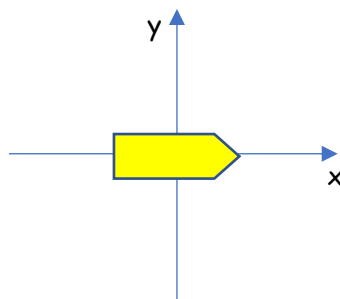


Figura 46: Sistema de eixos do veículo

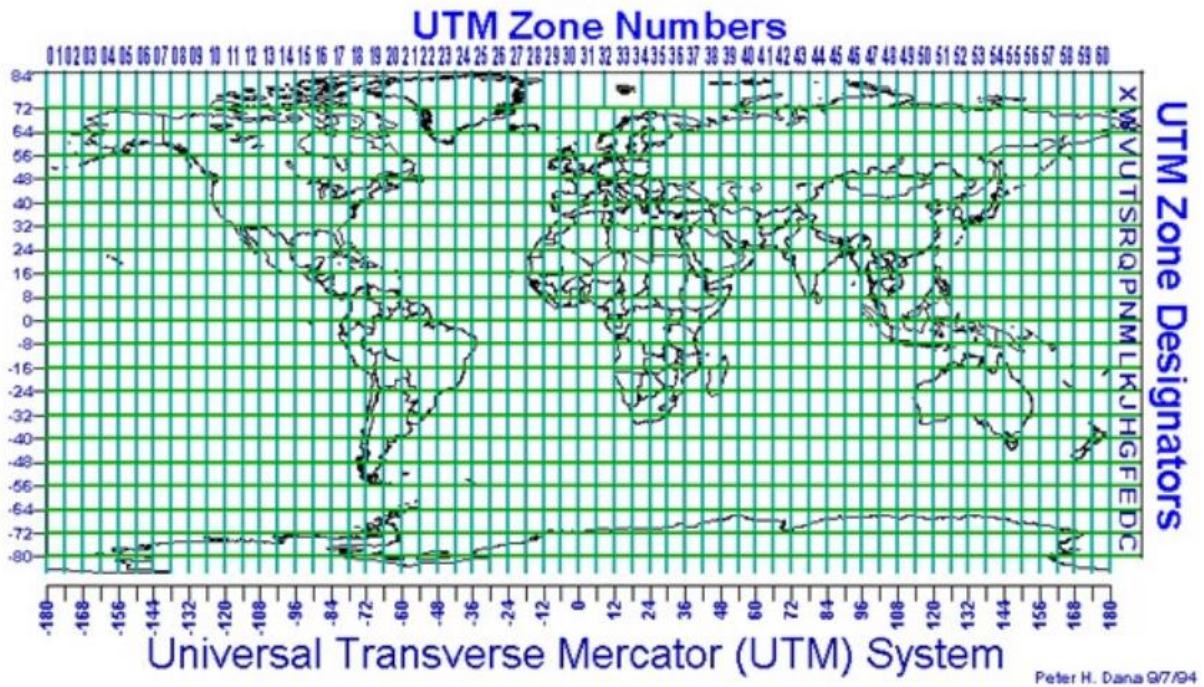


Figura 47: Quadricula UTM do sistema de coordenadas WGS84. (Droneng, 2017)

Assim, para determinar as rotações a ser efetuadas pode escrever-se o seguinte sistema de equações, relativo à transformação tridimensional:

Equação 6: Transformação tridimensional

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$

Em que R é uma matriz rotação tridimensional, função de três rotações em torno de cada um dos eixos (ω em torno de xx, φ em torno de yy e k em torno de zz), por esta mesma ordem. Os ângulos de rotação referidos consideram-se positivos quando crescem no sentido anti-horário, vistos do extremo positivo do eixo respetivo. A matriz $R=R_{k\varphi\omega}$ pode construir-se por multiplicação de matrizes $R_k \cdot R_\varphi \cdot R_\omega$:

Equação 7: Matriz Rotação

$$R_{k\varphi\omega} = R_k \cdot R_\varphi \cdot R_\omega = \begin{bmatrix} \cos k & \sin k & 0 \\ -\sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix},$$

Obtendo-se:

Equação 8: Matriz rotação tridimensional

$$R = R_{k\varphi\omega} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos k & \sin\omega \sin\varphi \cos k + \cos\omega \sin k & -\cos\omega \sin\varphi \cos k + \sin\omega \sin k \\ -\cos\varphi \sin k & -\sin\omega \sin\varphi \sin k + \cos\omega \cos k & \cos\omega \sin\varphi \sin k + \sin\omega \cos k \\ \sin\varphi & -\sin\omega \cos\varphi & \cos\omega \cos\varphi \end{bmatrix}$$

Uma vez determinada a rotação do ponto medido é necessário efetuar uma translação correspondente à distância horizontal nos eixos coordenados xx e yy entre a localização real do veículo e a vertical do ponto medido para obter as coordenadas do ponto medido pelo sonar de forma a obter um resultado (figura 48).

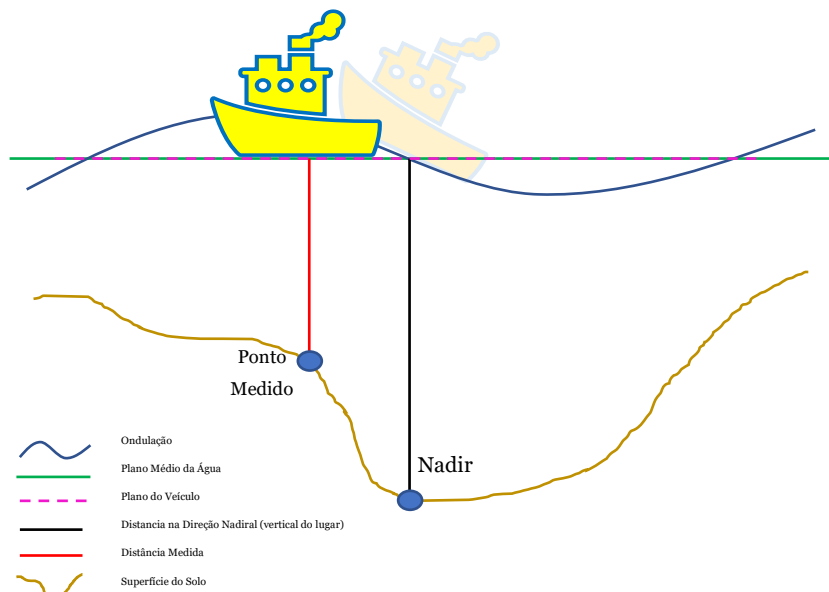


Figura 48: Esquema do posicionamento corrigido do veículo

Para determinar as translações segundo o eixo xx, eixo yy e eixo zz é calculada uma matriz translação:

Equação 9: Matriz translação

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix}$$

Onde:

t_x , t_y , t_z correspondem às variáveis da translação segundo cada um dos eixos e w corresponde ao fator escala local.

Para determinação das variáveis da translação (correspondentes às distâncias “C” e “D” na figura 49) recorre-se a relações trigonométricas para resolução de triângulos onde α é dado pelos sensores de inclinação do veículo, “D” corresponde ao cateto adjacente, “C” o cateto oposto e “d” a hipotenusa.

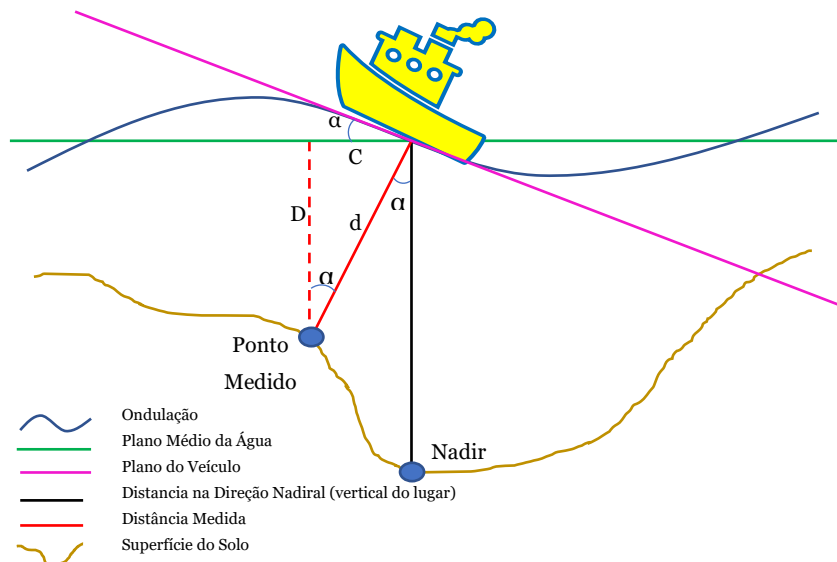


Figura 49: Cálculo das translações por relações trigonométricas

Uma vez efetuadas as operações de rotação e translação é possível fazer um modelo digital de elevação (MDE) com as coordenadas corrigidas dos pontos medidos. Esta operação é realizada recorrendo ao ArcGIS utilizando as ferramentas raster para o cálculo de modelos digitais do terreno (MDT), conforme o esquema seguinte.

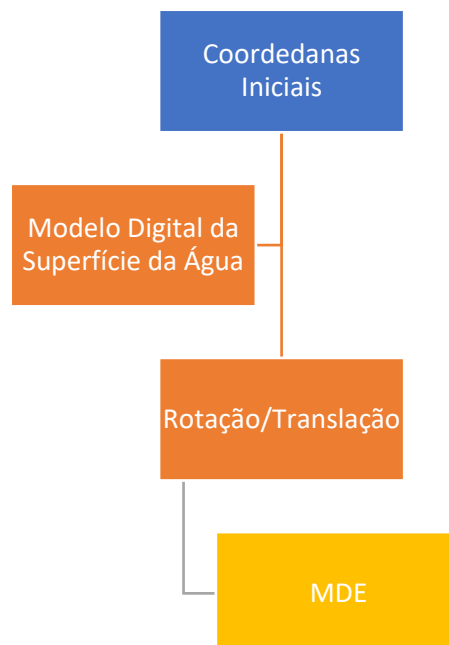


Figura 50: Metodologia para o cálculo do Modelo Digital de Elevação (MDE) em cada época de observação

4. CASO DE ESTUDO

O avanço tecnológico está mais acelerado do que nunca e isso permite o desenvolvimento de equipamentos com capacidade de operação cada vez mais desenvolvida no que toca à aquisição de dados e atualmente é possível ter plataformas de aquisição de dados, seja de forma direta com um técnico a operar um equipamento, ou com veículos não tripulados, é possível recolher um elevado volume de dados em pequenos períodos de tempo. Com a miniaturização e incorporação de sensores, o desenvolvimento de aeronaves não tripuladas, vulgo drones, ou outros veículos não tripulados como barcos ou submarinos, é possível alcançar objetivos que anteriormente seria impossível com a tecnologia existente.

Para inspeção aquática ou subaquática é possível encontrar veículos operados remotamente, mas com custos de aquisição, operação e manutenção ainda muito elevados, pela complexidade que estes veículos acarretam. Assim o desenvolvimento de um aparelho à medida, recorrendo a equipamentos de baixo custo utilizados com outras finalidades e adaptados a um veículo remoto permite ponderar a construção de um protótipo de um veículo aquático não tripulado para o desenvolvimento deste estudo.

Com os sistemas de informação geográfica é possível integrar toda a informação recolhida em tempo real e disponibilizar os resultados de uma forma eficiente, dinâmica e de fácil interpretação.

4.1 Aplicação da metodologia SIG

A utilização de um SIG para recolha e produção de informação geoespacial é uma mais-valia na qualidade e eficiência na obtenção de resultados e recorrendo ao ArcGIS foi possível processar toda a informação disponível e determinar assim os potenciais locais de perda ou acumulação de sedimentos.

Foram utilizadas todas as variáveis requeridas (fator de erosividade, fator erodibilidade, fator topográfico, fator do coberto vegetal e fator de prática agrícola), com resolução espacial de 10m, para o processo de cálculo da Equação Universal de Perda do Solo, que culminou na produção da carta de perda de solo específico.

Utilizando a fórmula para o cálculo de perda de solo específico em ambiente SIG, resultou no mapa que representa as zonas de maior perda de solo específico apresentada na figura 51.

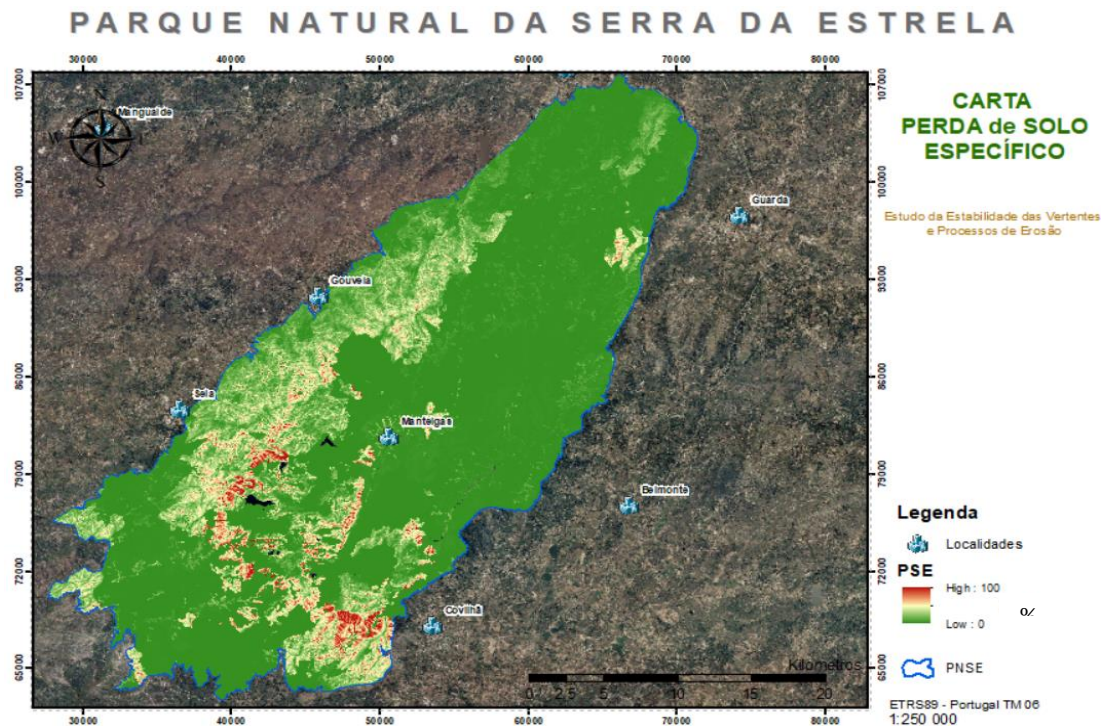


Figura 51: Carta de Perda de Solo Específico

A instabilidade das vertentes é um fenómeno muitas vezes difícil de localizar de forma a possibilitar um tempo de reação que permita a mitigação dos problemas estruturais do solo evitando assim possíveis derrocadas com elevados danos em zonas habitacionais com registo de mortes localizadas. Caso a instabilidade leve ao movimento de massas para além das vítimas, os danos irreparáveis provocados em equipamentos e redes viárias é um grave problema uma vez que inviabiliza o socorro e apoio a zonas afetadas. Recorrendo à carta de estabilidade de vertentes e determinando os fatores de segurança para as zonas de estudo (figura 52), é possível implementar medidas de mitigação aos riscos existentes.

Os vários softwares de sistemas de informação geográfica existentes atualmente no mercado permitem realizar análises bastante elaboradas e detalhadas que posteriormente servem de suporte no apoio à decisão tanto de um ponto de vista estratégico e de planeamento, como de um ponto de vista reativo a qualquer ocorrência que se tenha produzido.

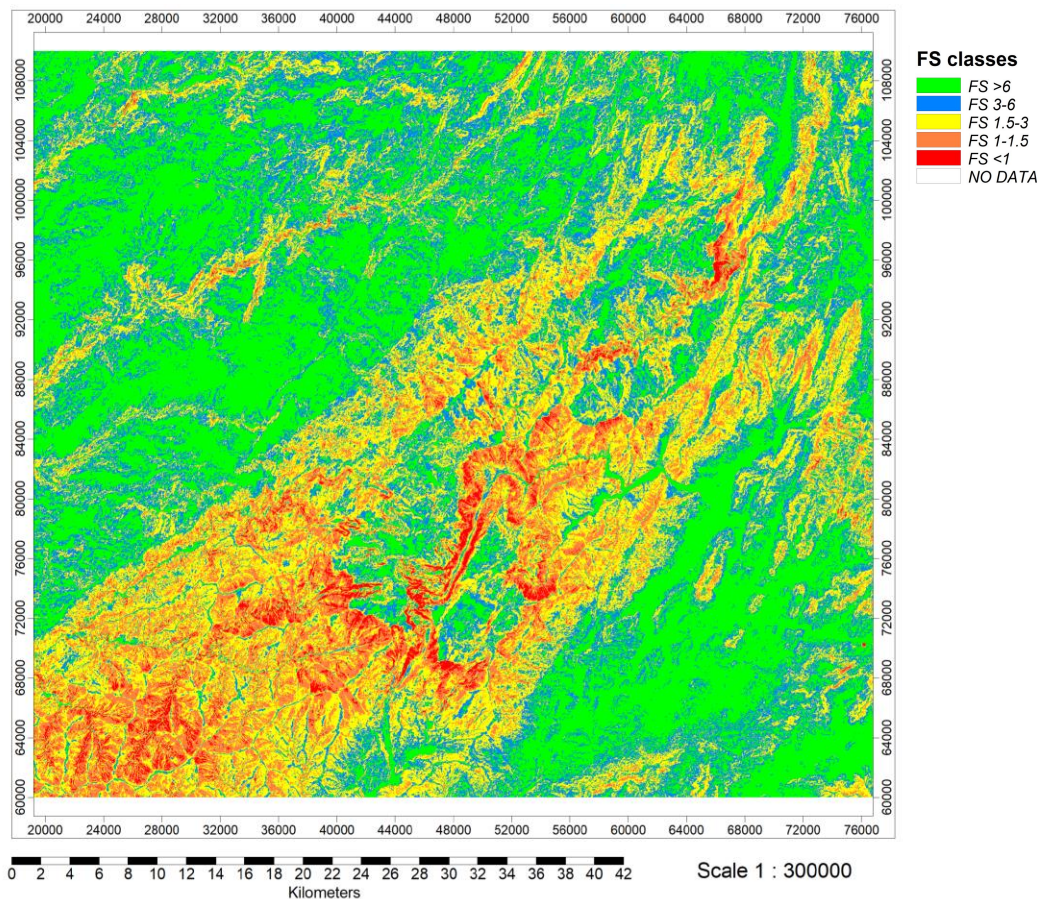


Figura 52: Fator de segurança de deslizamentos de massas em função da inclinação. Gerada em SAGA.

Para este trabalho foram utilizados vários sistemas tais como ArcGIS, GRASS e SAGA.

Tanto o GRASS como o SAGA, foram utilizados porque já contêm módulos de análise hidrológica e de terreno.

O GRASS (Geographic Resources Analysis Support System)(GRASS GIS, 2020) é um software livre de SIG de fonte aberta. É um sistema de código aberto, utilizado para a gestão de dados geoespaciais e análise, processamento de imagens, gráficos e mapas, modelação espacial e visualização.

O SAGA GIS (SAGA, 2020), Sistema de Análises Geocientíficas Automatizado é um software sobre sistema usado para editar dados espaciais, é de código aberto, originalmente desenvolvido por uma equipa no departamento de geografia física da Universidade de Göttingen na Alemanha, está a ser mantida e estendida por uma comunidade de desenvolvimento internacional.

SAGA GIS é uma plataforma eficaz e intuitiva para implementar métodos geocientíficos. Isto é conseguido através da interface de programação de aplicações (API), tem um conjunto de expansão rápida dos métodos geocientíficos, agrupados em bibliotecas de módulos.

As aplicações de código aberto são uma mais-valia em estudos muito específicos uma vez que permitem ajustar os módulos em função das necessidades que surgem.

O ArcGIS Desktop (ESRI, 2020) é um software proprietário e uma família de aplicações de sistemas de informação geográfica mais amplamente utilizadas no mundo. Inclui várias ferramentas e funcionalidades que permitem análises de informações muito completas.

Os métodos aplicados para a elaboração dos mapas necessários para a determinação de zonas de risco decorrente de erosões ou deposição de sedimentos que, por conseguinte, poderão levar à instabilidade de solos em zonas inundadas ou alagadas e onde é necessário quantificar em tempo útil o perigo de movimento de massas, foi a conjugação de diversas equações onde é possível fazer uma previsão de potenciais zonas de risco elevado.

Foram também utilizados dados recolhidos pelos resultados da simulação de fluxos de água superficial e o transporte de sedimentos por escoamento superficial.

Para a simulação de fluxos de água superficial recorreu-se ao módulo r.sim.water do software GRASS GIS onde são estimadas as profundidade de água, fluxos de água e precipitação no solo. Para a simulação de transporte de sedimentos por escoamento superficial recorreu-se ao módulo r.sim.sediment do software GRASS GIS, ainda que não tenham sido incluídos nos resultados deste estudo pela necessidade de calibrar o sistema de simulação com dados técnicos muito específicos e complexos.

Para os locais inacessíveis por via terrestre e/ou não visíveis por deteção remota tais como são os corpos de água, para a aplicação das técnicas mencionadas anteriormente utilizando os algoritmos que permitam os cálculos com as plataformas em exemplo, SAGA, GRASS ou Arcgis, foi necessária a utilização de um veículo aquático não tripulado autónomo e automático para a recolha de dados do estado dos fundos submersos de forma a ser possível determinar possíveis deslocamentos de terras subaquáticas entre campanhas de observação batimétrica realizadas recorrendo ao veículo não tripulado. Posteriormente em ambiente SIG são calculadas as diferenças entre épocas (horas, dias, semanas, etc.) de modo a elaborar um mapa de suscetibilidade atualizado em tempo quase real das zonas submersas.

4.1.1 - Fatores para determinação da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS)

Para determinação e representação dos fatores a ter em conta para gerar a carta de perda de solos foi utilizado um sistema de informação geográfica de forma a obter uma informação gráfica e numérica capaz de suportar decisões a tomar no planeamento e ordenamento do território.

4.1.1.1 - Fator de Erosividade, R

Para o cálculo deste fator recorreu-se à informação disponível no Atlas da Água para uma precipitação de 50.8mm, sendo o caso mais desfavorável proposto pela (CNT, 2015).

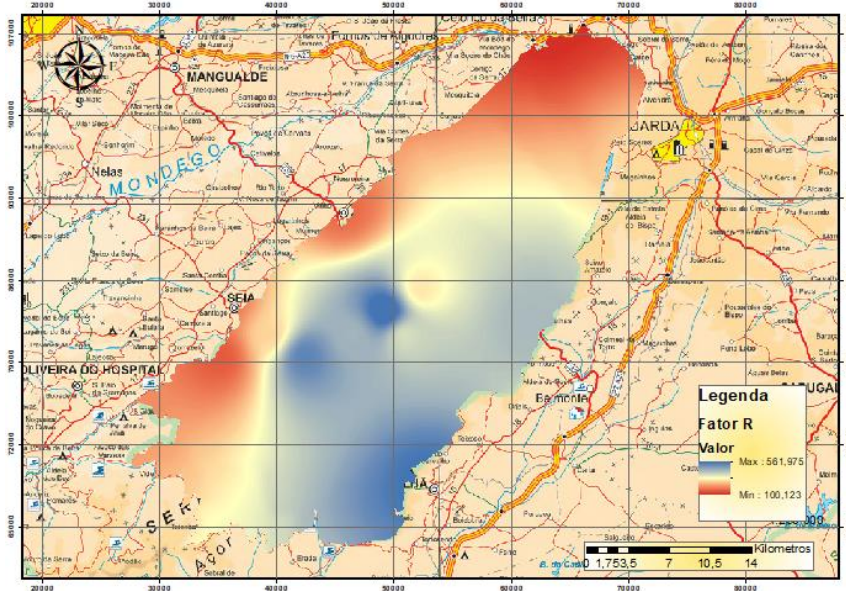


Figura 53: Representação do Fator R

4.1.1.2 - Fator de Erodibilidade, K

A imagem 54 representa o factor K com base nas diretrizes para a Aplicação da Equação Universal da Perda de Solos em SIG, disponibilizadas pelo INAG (Pimenta, 1998).

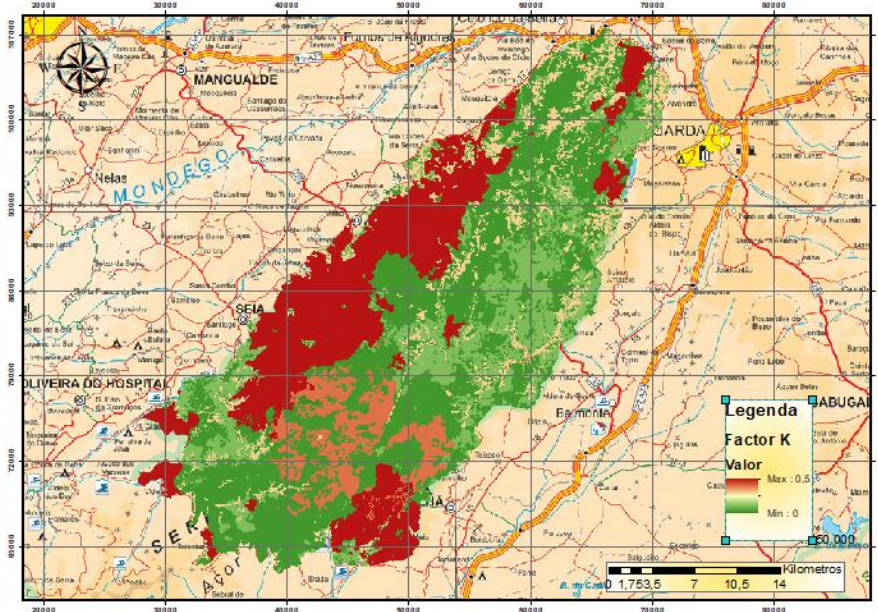


Figura 54: Representação Fator K

4.1.1.3 - Fator Topográfico, LS

A imagem 55 representa o declive numa escala de cores entre 0° e 62°, mínimo e máximo respetivamente.

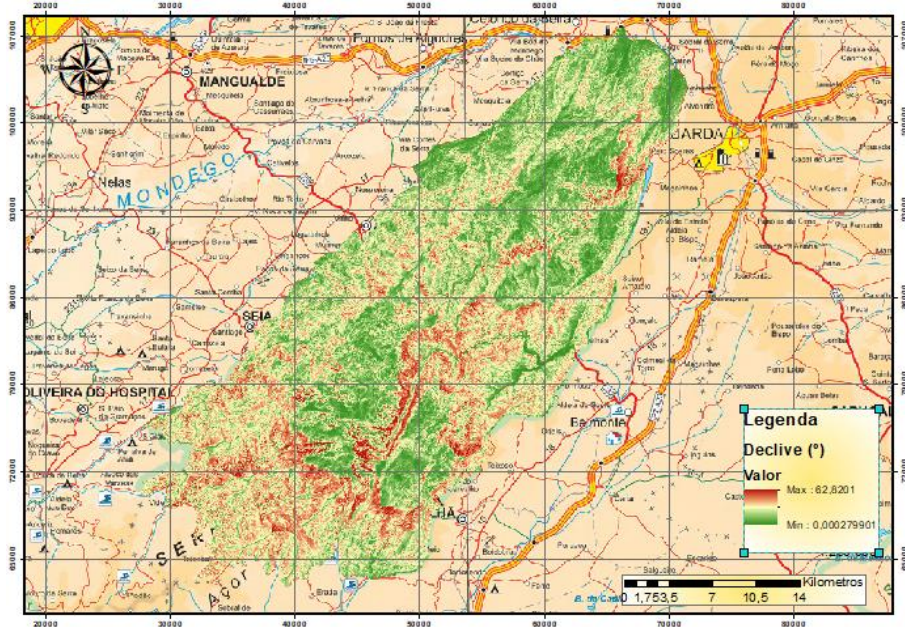


Figura 55: Representação do Declive

Neste caso, para o cálculo do fator LS são introduzidos os dados do modelo digital do terreno com resolução de 10m.

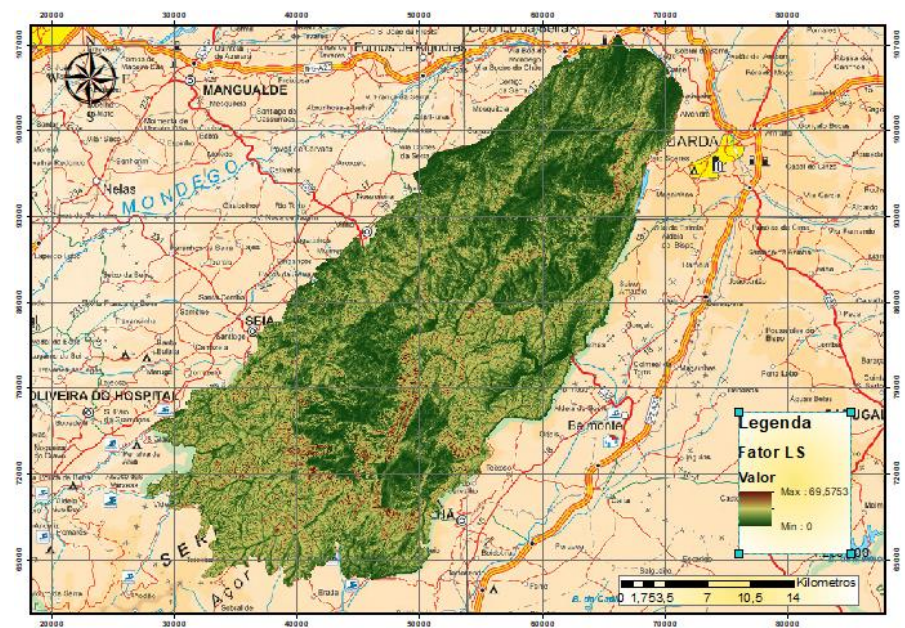


Figura 56: Representação Fator LS

4.1.1.4 - Fator de Coberto Vegetal, C

Com base na carta COS2010 (figura 57) foi então gerada a carta de Fator C (figura 58) com base na classificação da tabela 3, proposta pelo INAG (Pimenta, 1998), em que a legenda da carta COS2010 se encontra em anexo.

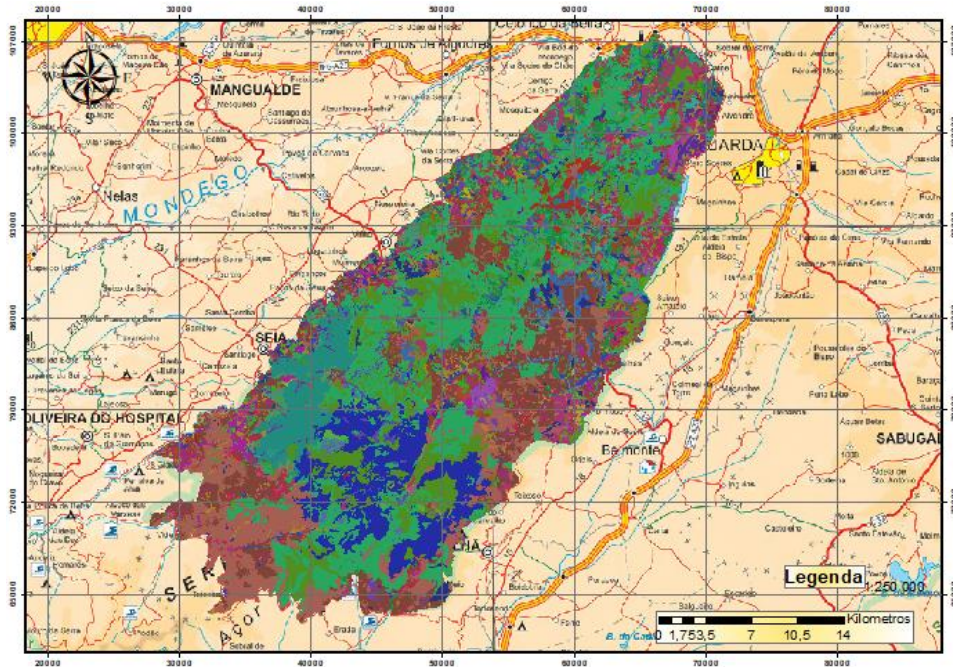


Figura 57: Representação COS 2010 e respetiva legenda

Após a reclassificação da COS2010 segundo a tabela 3, foi gerado o Fator C (figura 58).

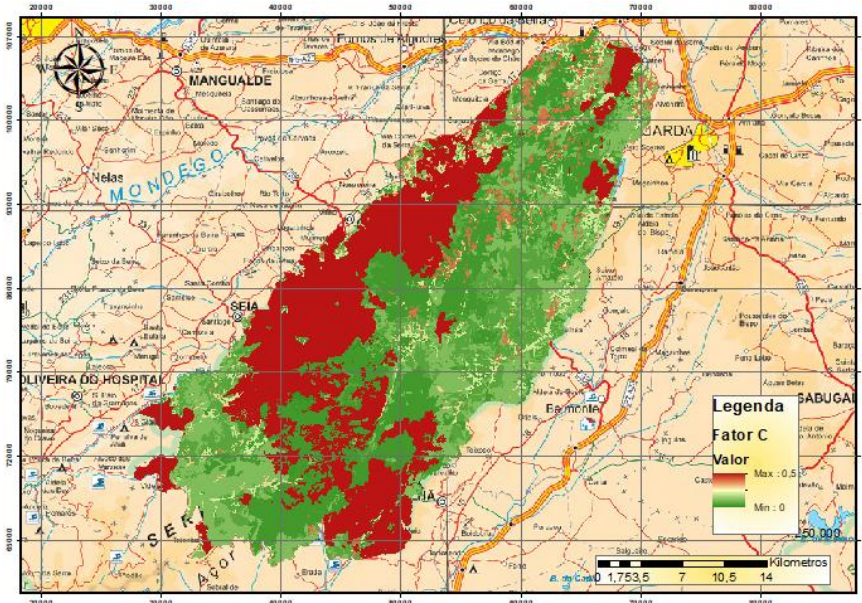


Figura 58: Representação Fator C

4.2 Desenvolvimento de Protótipo de Veículo Não Tripulado

A problemática da monitorização de zonas submersas ou inundadas continua a ser uma tarefa de elevada dificuldade devido à sua complexidade e logística para recolha de informação batimétrica.

Para melhor estudar esta temática foi desenvolvido um veículo autónomo, operado remotamente, com capacidade para operar por longos períodos de tempo e transmitir dados em tempo real para uma estação de trabalho por forma a acompanhar de forma precisa e apoiar à tomada de decisão num curto espaço temporal.

Este veículo pretendia-se de fácil manuseamento, com grande autonomia e com possibilidade de recolha de dados georreferenciados com várias valências e a um custo em que a qualidade dos dados seja o suficiente para deteção de movimentos de massas ou outros dados passíveis de obter com sensores/sondas a bordo e fácil manutenção para que não seja um encargo elevado para a aquisição deste tipo dados pelas vias tradicionais de realização de batimetrias.

4.2.1 - Conceção do Protótipo

Inicialmente realizou-se uma pesquisa do mercado existente a fim de compreender que tipo de veículos já existem no mercado e reúnam os requisitos mínimos requeridos para a realização deste trabalho. Uma vez concluído o estudo inicial da oferta de mercado percebeu-se que o custo deste tipo de veículo era bastante elevado inviabilizando assim a possibilidade deste estudo, assim pensou-se na construção de um protótipo com as valências necessárias para estes trabalhos e seguiu-se com o esquema apresentado a seguir.

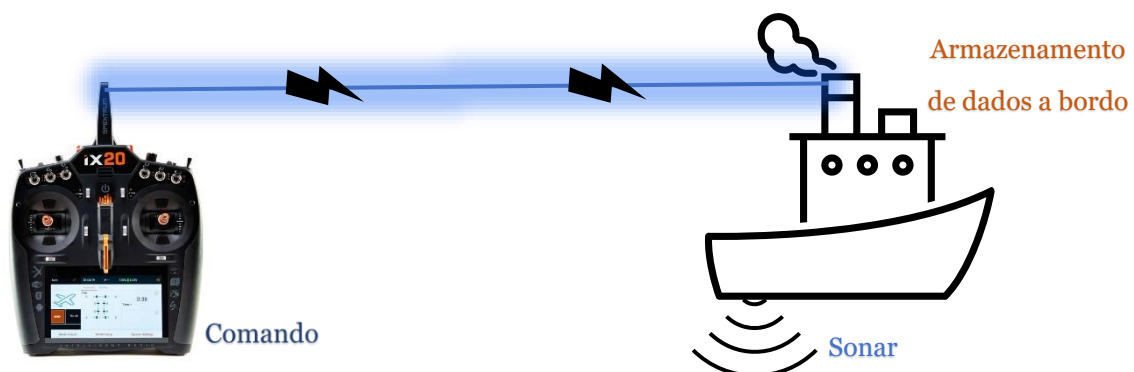


Figura 59: Esquema inicial de montagem do veículo

Este protótipo seria composto por um barco com sonar a bordo e operado remotamente por comando.

Uma vez estabelecido o esquema de montagem procurou saber-se que tipo e veículo convinha melhor para o tipo de operações a realizar. Teriam de ser estudadas a flutuabilidade, estabilidade, robustez da estrutura, tamanho e peso.

Por forma a minimizar a instabilidade provocada pela ondulação e consequentemente introdução de erro nas medições do sonar por este não se encontrar sempre na vertical do lugar a medir num plano perpendicular ao espelho de água, optou-se por uma embarcação do tipo catamaran (figura 60). Isto permite que com dois flutuadores espaçados entre si, o centro de gravidade do veículo se encontre num local que permite uma maior estabilização do conjunto. Para além disso, este tipo de embarcação permite um espaço útil de armazenamento de equipamentos a bordo que será uma mais-valia na multi-operacionalidade do veículo podendo assim instalar uma grande variedade de sensores e sondas a bordo.

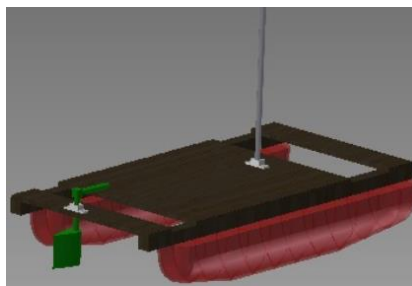


Figura 60: Modelo 3D do Catamaran (Michael, 2015)

Aquando do processo de esquematização do modelo verificou-se que este modelo teria uma grande limitação ao ter um operador em constante manobra do veículo, isso acarretaria problemas de autonomia, fiabilidade dos dados adquiridos uma vez que não seria possível garantir que toda a superfície seria varrida e ainda a limitação de distância entre o recetor e o transmissor. Nesta altura pensou-se em automatizar o veículo e torná-lo autónomo e automático.

Isso permitiria programar as missões do veículo de uma forma remota e sendo o operador um mero vigilante.

Foi adquirido um controlador para veículos aeromodelos que permitiria assim programar missões e conectar vários sensores que iriam auxiliar a navegação e recolha de dados. Nesta altura o veículo já se encontra georreferenciado com GNSS e com sensores IMU (Inertial measurement unit) para controlar a sua posição no espaço.

Os flutuadores foram fabricados em impressora 3D e posteriormente revestidos com resina de poliéster e fibra de vidro de modo a oferecer uma grande resistência a impactos e garantir a impermeabilidade dos flutuadores.

O esquema de montagem do veículo está agora definido e foi necessário pensar nas precisões e erros esperados nas observações. Sabemos à partida que o sonar tem precisão centimétrica o que é perfeitamente aceitável para trabalhos de batimetria com esta finalidade, no entanto, a componente planimétrica estaria definida pelo sistema GNSS, que oferece uma precisão métrica. Ora isto poderia ser um problema que só seria resolvido com um sistema GNSS de maior precisão ou com sucessivas passagens pelos mesmos locais de forma a reduzir estatisticamente os erros observados. Nenhuma destas opções seria viável, então pensou-se em fazer a georreferenciação do veículo com recurso a uma estação total robotizada, uma vez que este equipamento não está fisicamente ligado ao veículo e sendo muito mais caro do que todo o conjunto do veículo não tripulado. A estação total já é largamente utilizada por empresas da área das ciências geoespaciais noutros trabalhos da especialidade e assim permitindo apenas que esta possa ser utilizada também neste caso sem a necessidade de aportar mais custos acrescidos, assim, com a estação total a medir em continuo e garantindo precisões milimétricas tanto na componente planimétrica como na componente altimétrica no que toca ao posicionamento do veículo e tornando assim o sistema de posicionamento redundante para ser utilizado em locais confinados porque a perda de sinal de satélites não comprometeria a missão, conforme demonstrado no esquema seguinte.



Figura 61: Esquema de funcionamento do sistema

A comunicação entre as diversas plataformas (controle remoto/veículo/estação terrestre) é garantida por sinal rádio que garante a transmissão de dados em tempo real para mitigar a perda de dados que são armazenados em multi-plataformas (veículo/estação terrestre/sonar/estação total)

A utilização de um equipamento topográfico de grande precisão foi implementada de forma a tentar mitigar a perda de sinal GNSS em zonas com fraca qualidade de sinal e também na tentativa de aumentar a precisão planimétrica do posicionamento do veículo. A estação total deverá fazer um seguimento automático do veículo efetuando observação com frequência de um segundo (1s) que serão enviadas para a estação terrestre para processamento com os dados recebidos do sonar a bordo do veículo. Desta forma, recorrendo a um micro-processador é possível recolher as coordenadas da estação total e compilar com as profundidades provenientes do sonar para assim construir um batimétrico.

Esta comunicação é fundamental para realizar um acompanhamento à distância da batimetria em tempo real na estação terrestre, permitindo assim também atualizações nas missões em tempo real de forma a manter uma ligação constante com as operações em campo como representado na figura 62. Este sistema de comunicação tem a capacidade de enviar todos os dados recolhidos (posicionamento GNSS, telemetria do veículo, profundidades do sonar e coordenadas da estação total) para a estação terrestre para análise do comportamento dos componentes (figura 62) e também para efetuar correções em pós-processamento dos dados recolhidos em campo. Desta forma, e utilizando o mesmo protocolo de comunicação, é possível acoplar ao veículo inúmeros sensores para medições de outras grandezas que se pretendam estudar como por exemplo a temperatura da água, a sua condutividade ou a turbidez.

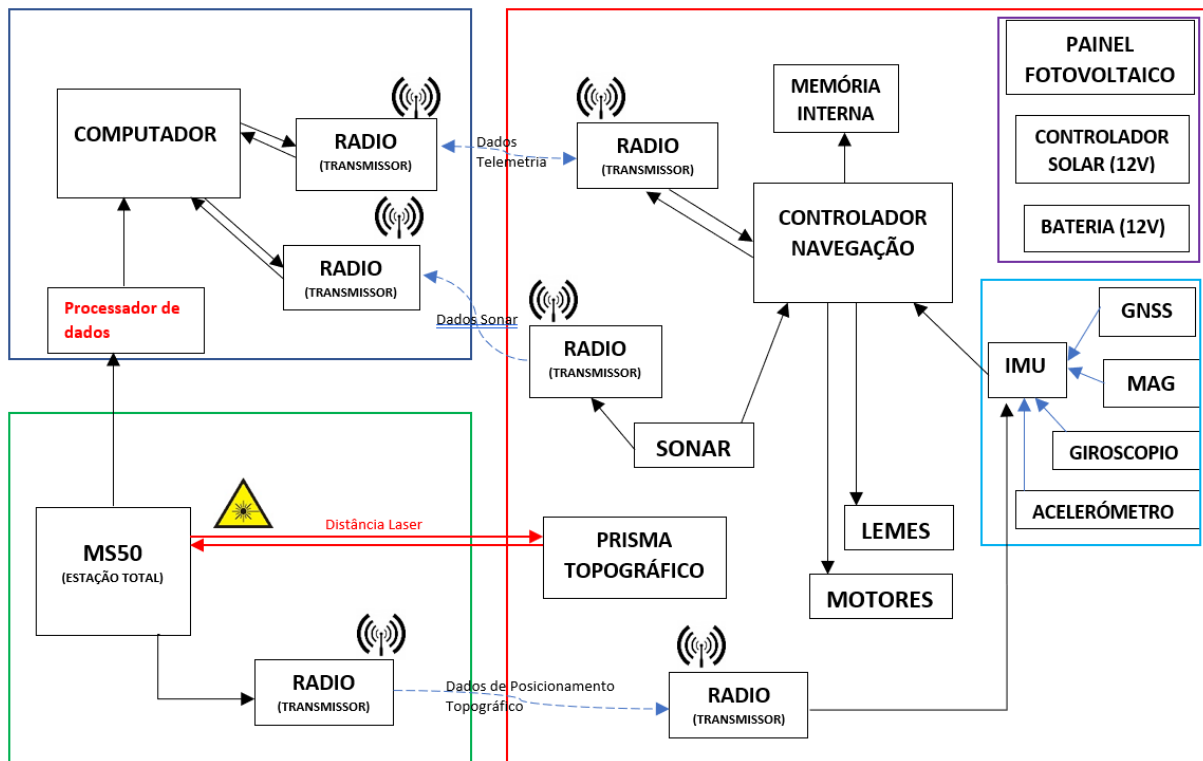


Figura 62: Arquitetura do Sistema

Este protótipo (figura 63), estando completamente funcional, permitirá reduzir custos de logística e recursos humanos tendo em conta as finalidades para o qual foi desenhado, uma vez que poderá ser operado por uma única pessoa mais um auxiliar para montagem e desmontagem do sistema. Os custos de fabrico são também bastante reduzidos tendo em conta as soluções encontradas no mercado, tendo este protótipo um custo de fabrico aproximadamente de 500€ sendo que o componente mais dispendioso é o sonar (~300€) e excluindo todos os equipamentos externos ao protótipo, como estação total robótica, computadores e outros acessórios.



Figura 63: Protótipo do veículo não tripulado

Este protótipo foi desenhado de forma a conter:

- 2 Flutuadores ABS
- 2 baterias 12v 7Ah
- 1 painel fotovoltaico 12v, 2.5A
- 1 controlador de carga
- 2 motores elétricos
- 1 controlador de motores
- 2 servos direcionais
- 2 veios com hélice
- 3 rádios de transmissão de dados LoRa
- 1 recetor RC de 6 canais
- 1 Controlador de aeromodelos (Pixhawk)
- 1 GNSS de baixo custo
- 1 Sonar (Garmin)
- 1 prisma topográfico 360°.

Estes componentes estão todos interligados no controlador de navegação, o que permite a automatização de missões e permitem que todas as funcionalidades sejam centralizadas num único componente de forma a ser possível o controlo de todos os elementos em tempo real (figura 64).

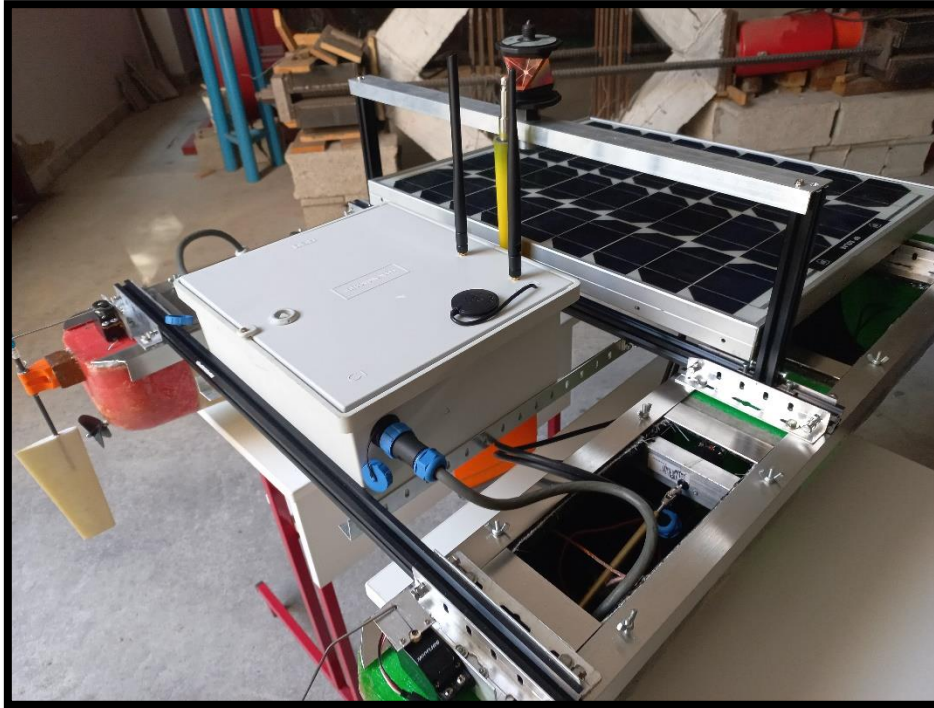


Figura 64: Elementos de navegação do protótipo de veículo não tripulado.

Para além deste equipamento é necessária uma estação terrestre para recolher a telemetria do veículo e os dados em tempo real da batimetria em curso. A estação terrestre é composta por:

- Computador/Estação Terrestre (Mission Planner e ReefMaster versão Trial)
- 2 Rádio de transmissão de dados LoRa
- Estação total robotizada de 1" de precisão angular e 1mm+1ppm de precisão do distanciómetro.

4.3 Resultados e Análise

Desta forma, seguindo a metodologia proposta, obteve-se o resultado representado na figura seguinte e que se encontra em anexo a este documento onde é possível ver que os valores para a erosão específica na zona da Serra da estrela são maioritariamente baixos, não existindo por isso uma grande ocorrência de erosão. É exceção a zona afetada por incêndios nos últimos anos que de forma severa acelera muito significativamente o fenómeno da erosão como se verifica na figura 65 e na tabela 4, onde se registam os valores mais elevados de perda de solo.

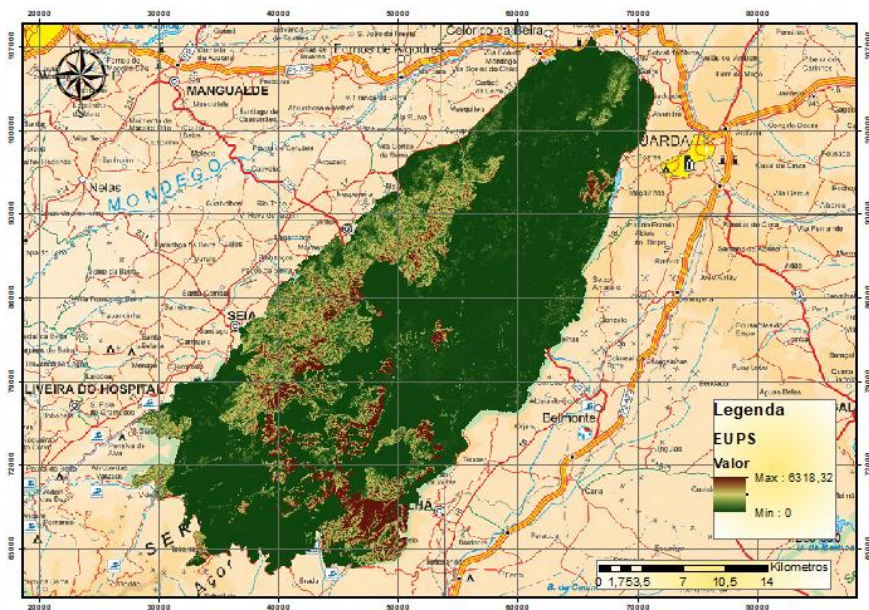


Figura 65: Representação da EUPS

As elevadas pendentes das encostas são também um fator determinante conjugado com o tipo de solo existente, ocorrendo assim uma perda de solo bastante significativa.

Tabela 6: Informação estatística dos resultados

	Valor
Máximo	6318,32
Média	150,02
Mínimo	0,00
Desvio Padrão	276,30
	(t ha ⁻¹ ano ⁻¹)

Conclui-se também que existem zonas pouco suscetíveis a perda de solos devido ao declive pouco elevado nos planaltos da Serra da Estrela e também à ocupação do solo existente nos locais que atrasam os processos de erosão.

A utilização do veículo não tripulado para a recolha de informação do fundo aquático complementa os dados de superfície por forma a conhecer melhor o fluxo de detritos até à sua deposição no interior de uma albufeira

Foi realizada uma campanha de batimetria, para prova de conceito da metodologia e do equipamento, numa albufeira da Serra da Estrela com recurso ao protótipo para validação do conceito e pré-análise da fiabilidade dos resultados.

Dos resultados obtidos com o protótipo, foi gerado um modelo digital de superfície do fundo aquático da albufeira como demonstrado na figura 66.

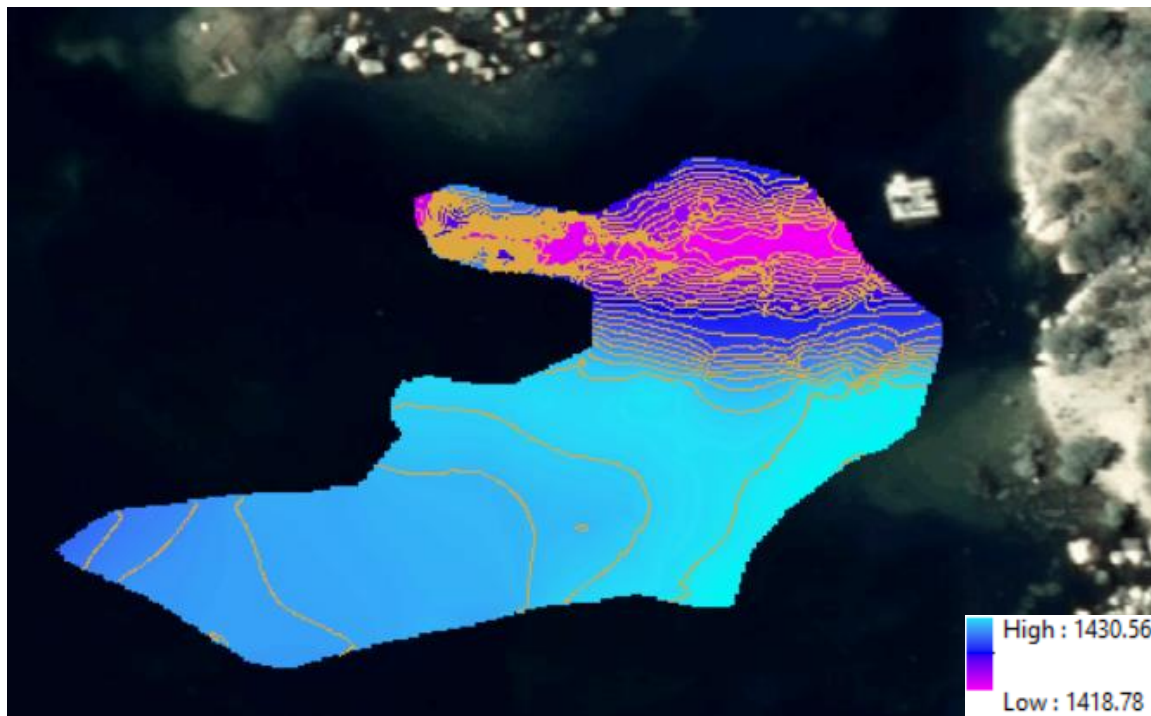


Figura 66: Modelo Digital de Superfície com curvas de nível

Destes resultados, verificou-se a existência de um desnível acentuado junto à torre existente na albufeira o que poderá indicar um local de forte erosão, com o local mais profundo a cerca de 12m da superfície como demonstra a figura 67.

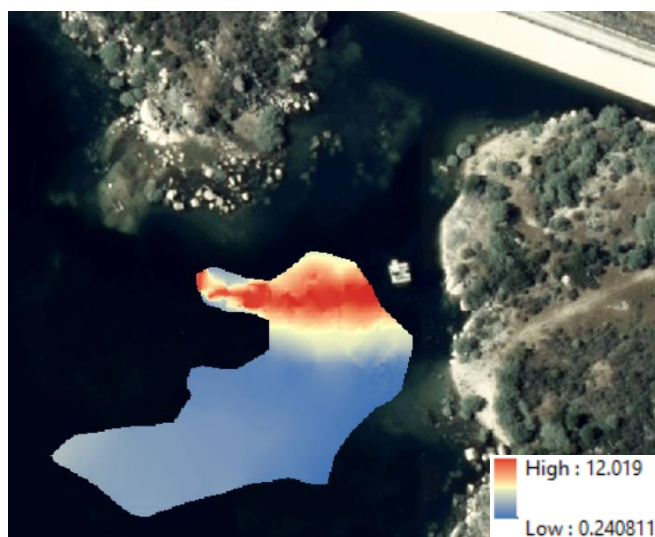


Figura 67: Mapa de profundidades

Registou-se ainda que uma grande parte da zona observada indicava uma profundidade média de 1.5m a 2m, existindo áreas inferiores a 50cm de profundidade o que indica que este trabalho seria bastante difícil de executar recorrendo a embarcações convencionais uma vez que o calado e a profundidade do sonar colocaria em risco a embarcação e sua tripulação bem como os equipamentos.

O percurso do veículo (figura 68) foi feito de forma a observar em tempo real as zonas de maior variação de desnível para assim conseguir um modelo mais detalhado do fundo da albufeira como representado na figura 68 e assim fazer sobreposição de passagens caso assim fosse entendido necessário.

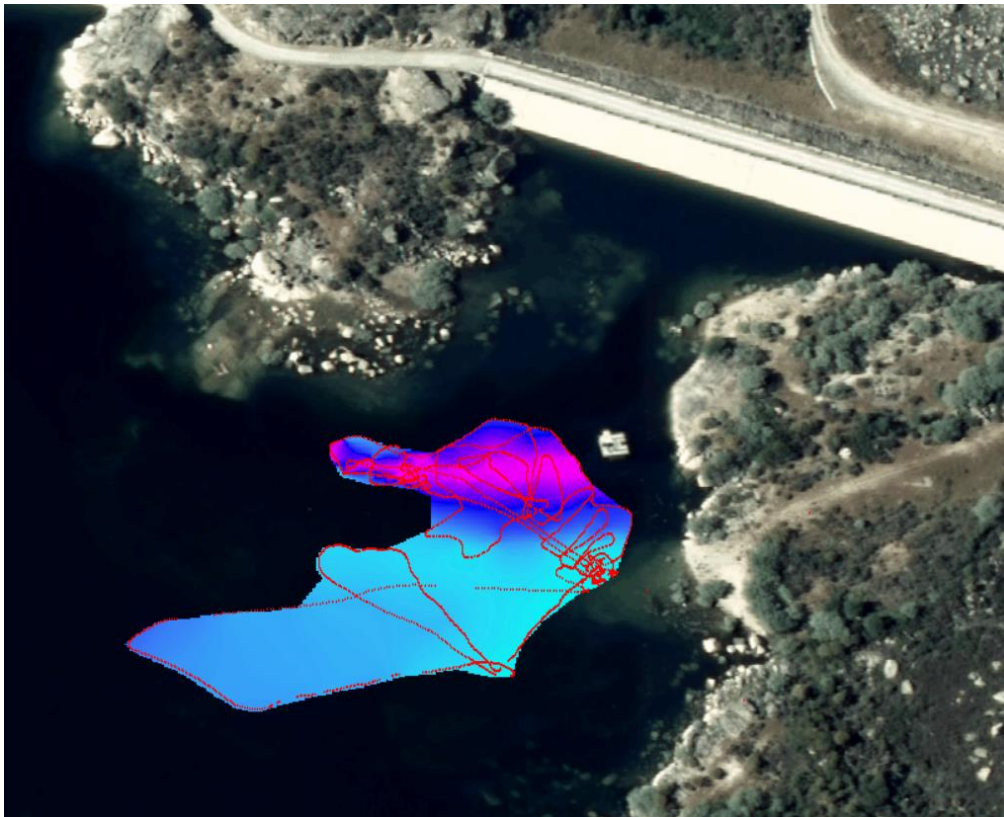


Figura 68: Modelo digital de superfície com representação do percurso do veículo não tripulado.

Com o equipamento a medir em contínuo com recurso à estação total (figura 69) em terra e ao sonar embarcado, para conseguir resultados de posicionamento com precisão centimétrica, foi feita uma análise da qualidade dos dados recolhidos em cota (plano de água) pela estação total como representado na figura 70, em que o valor de cota de cada pixel do raster do modelo gerado pelas cotas da estação total foi subtraído ao valor médio para assim ser possível uma análise da qualidade dos dados.



Figura 69: Equipamento em operação com medição contínua com recurso a estação total

A variação de cota no plano de água é possível devido à ondulação e ao movimento do próprio veículo, tendo sido obtido um desvio padrão para este resultado de cerca de 5mm, sendo que os valores mínimos correspondem à fase de manuseamento do equipamento, tendo assim sido possível modelar o erro esperado no posicionamento altimétrico do veículo como apresentado na figura 70.

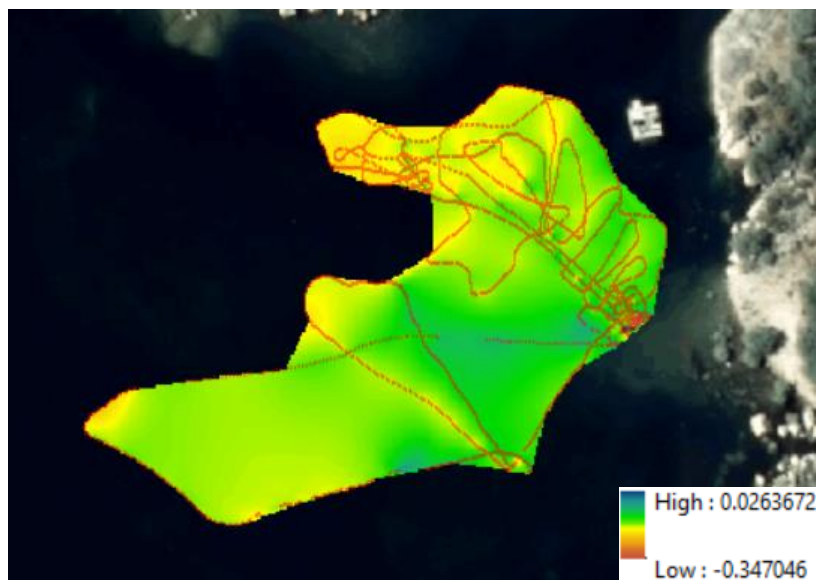


Figura 70: Diferenças de cota com o valor médio.

Uma vez tendo sido realizada a primeira campanha de batimetria, esta é considerada a campanha de referência, e estando assim estabelecida a origem para o controlo de erosão e sedimentação da albufeira que com recurso a este tipo de embarcação pode ser realizado frequentemente e de modo automatizado.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Nos últimos anos tem-se verificado uma aceleração da perda dos solos em algumas regiões, muito por consequência das alterações climáticas e pelos incêndios registados cada vez com mais severidade e com mais frequência nas mesmas zonas, não permitindo assim uma correta regeneração natural da vegetação que impediria parte dos fenómenos de erosão.

Verifica-se que cada vez existem mais ferramenta de utilização livre com potencial para efetuar análises e o avanço tecnológico permite o processamento de um grande volume de dados para apoio à decisão. No entanto, os dados existentes ainda não são utilizados de forma correta e corrente por organismos e empresas que têm ao seu dispor uma elevada quantidade de opções de análise e acompanhamento do solo, clima e recursos naturais.

Foi possível realizar uma predição de zonas com potencial erosivo, e em zonas onde não foi possível fazer uma análise geral como são as zonas submersas, a recolha de dados pode ser complementada com recurso a veículos não tripulados.

Idealmente, este trabalho carece agora de algum desenvolvimento, como automatização dos processos de análise espacial em SIG de forma a acelerar a obtenção de resultados. Seria desejável introduzir novas técnicas de análise da superfície terrestre e estudar a sua viabilidade neste tema, como é o caso da tecnologia InSAR, estudo de deslocamentos na superfície terrestre com recurso a satélites equipados com radares e que atualmente já são de acesso livre (Copernicus, 2022). A plataforma desenvolvida pelo Programa de Observação da Terra, da União Europeia, no âmbito do projeto Copernicus, disponibiliza dados de forma livre com o registo dos deslocamentos da superfície terrestre. Esta análise deverá ser aprofundada de forma a perceber se o tipo de registo efetuado provém de um deslocamento do solo ou de erosão e sedimentação, para assim aferir outro tipo de análises com fontes de dados distintas como introduzir a análise do solo e coberto vegetal recorrendo a imagens de satélite, ou ainda a influencia dos ventos no solo.

Para pesquisa nas zonas submersas pode verificar-se que o veículo não tripulado tem um elevado potencial com o equipamento possível para o estudo, contudo, existindo a possibilidade de melhorar o protótipo com um equipamento de medição batimétrico com sonar de varrimento lateral multifeixe, um sistema IMU mais robusto e um sistema de geo-localização RTK, seria possível obter resultados com elevada resolução e rapidez abrindo a possibilidade de investigação noutros campos sendo assim possível estudar o tipo de sedimentos (granulometria) existente nas zonas submersas e também fazer o acompanhamento de património inundado para estudo da sua integridade e ainda realizar atualizações mais frequentes das curvas de capacidade das albufeiras de forma a conhecer com precisão a capacidade útil das albufeiras reduzindo assim desperdícios de água.

Sendo possível determinar o tipo de sedimentação encontrada, em zonas submersas ou não, o fator de perda de solo, e a realização de simulações hidrológicas para transporte de sedimentos, é possível estudar intervenções de estabilização dos solos de forma mais ponderada e localizada aumentando assim a probabilidade de sucesso e a mitigação dos fenômenos de erosão do solo.

Com os resultados obtidos, deveria estudar-se com maior rigor as zonas com maior suscetibilidade em perda de solo e introduzir novas variáveis como a velocidade e direção dos ventos dominantes, a lixiviação dos solos que dificultam o desenvolvimento de vegetação, análise de fluxos hidrológicos em eventos de cheias, estudo da evolução da vegetação ao longo do ano e também a aplicação de novas técnicas de observação e análise como imagens de satélite (ópticas ou radar) ou aplicação de algoritmos de análise hidrológica e evolução da cobertura terrestre.

6. Anexos

6.1 Legenda da carta COS 2010

 1.1.1.02.1 Tecido urbano contínuo predominantemente horizontal	 2.4.2.01.1 Sistemas culturais e parcelares complexos
 1.1.1.03.1 Áreas de estacionamento e logradouros	 2.4.3.01.1 Agricultura com espaços naturais e semi-naturais
 1.1.2.01.1 Tecido urbano descontínuo	 2.4.4.01.3 SAF de outros carvalhos com culturas temporárias de sequeiro
 1.1.2.02.1 Tecido urbano descontínuo esparsa	 2.4.4.01.5 SAF de outras espécies com culturas temporárias de sequeiro
 1.2.1.01.1 Indústria	 3.1.1.01.2 Florestas de azinheira
 1.2.1.03.1 Instalações agrícolas	 3.1.1.01.3 Florestas de outros carvalhos
 1.2.1.04.1 Equipamentos públicos e privadas	 3.1.1.01.4 Florestas de castanheiro
 1.2.1.05.1 Infra-estruturas de produção de energia renovável	 3.1.1.01.5 Florestas de eucalipto
 1.2.2.01.1 Rede viária e espaços associados	 3.1.1.01.6 Florestas de espécies invasoras
 1.3.1.01.1 Minas a céu aberto	 3.1.1.01.7 Florestas de outras folhosas
 1.3.1.02.1 Pedreiras	 3.1.1.02.3 Florestas de outros carvalhos com folhosas
 1.3.2.02.1 Lixeiras e Sucatas	 3.1.1.02.4 Florestas de castanheiro com folhosas
 1.3.3.01.1 Áreas em construção	 3.1.1.02.5 Florestas de eucalipto com folhosas
 1.3.3.02.1 Áreas abandonadas em territórios artificializadas	 3.1.1.02.6 Florestas de espécies invasoras com folhosas
 1.4.2.01.2 Outras instalações desportivas	 3.1.1.02.7 Florestas de outra folhosa com folhosas
 1.4.2.02.1 Parques de campismo	 3.1.2.01.1 Florestas de pinheiro bravo
 1.4.2.02.2 Outros equipamentos de lazer	 3.1.2.01.3 Florestas de outras resinosas
 1.4.2.03.1 Equipamentos culturais e zonas históricas	 3.1.2.02.1 Florestas de pinheiro bravo com resinosas
 2.1.1.01.1 Culturas temporárias de sequeiro	 3.1.2.02.3 Florestas de outra resinosa com resinosas
 2.1.2.01.1 Culturas temporárias de regadio	 3.1.3.01.2 Florestas de azinheira com resinosas
 2.2.1.01.1 Vinhas	 3.1.3.01.3 Florestas de outros carvalhos com resinosas
 2.2.1.02.1 Vinhas com pomar	 3.1.3.01.4 Florestas de castanheiro com resinosas
 2.2.1.03.1 Vinhas com olival	 3.1.3.01.5 Florestas de eucalipto com resinosas
 2.2.2.01.1 Pomares de frutos frescos	 3.1.3.01.6 Florestas de espécies invasoras com resinosas
 2.2.2.01.3 Pomares de castanheiro	 3.1.3.01.7 Florestas de outra folhosa com resinosas
 2.2.2.01.6 Outros pomares	 3.1.3.01.8 Florestas de misturas de folhosas com resinosas
 2.2.2.02.3 Pomares de castanheiro com vinha	 3.1.3.02.1 Florestas de pinheiro bravo com folhosas
 2.2.2.03.1 Pomares de frutos frescos com olival	 3.1.3.02.3 Florestas de outra resinosa com folhosas
 2.2.2.03.2 Pomares de amêndoa com olival	 3.1.3.02.4 Florestas de misturas de resinosas com folhosas
 2.2.2.03.3 Pomares de castanheiro com olival	 3.2.1.01.1 Vegetação herbácea natural
 2.2.3.01.1 Olivais	 3.2.2.01.1 Matos densos
 2.2.3.02.1 Olivais com vinha	 3.2.2.02.1 Matos pouco densos
 2.2.3.03.1 Olivais com pomar	 3.2.3.01.1 Vegetação esclerófila densa
 2.3.1.01.1 Pastagens permanentes	 3.2.3.02.1 Vegetação esclerófila pouco densa
 2.4.1.01.2 Culturas temporárias de sequeiro associadas a pomar	 3.2.4.01.2 Florestas abertas de azinheira
 2.4.1.01.3 Culturas temporárias de sequeiro associadas a olival	 3.2.4.01.3 Florestas abertas de outros carvalhos
 2.4.1.02.3 Culturas temporárias de regadio associadas a olival	 3.2.4.01.4 Florestas abertas de castanheiro
 2.4.1.03.3 Pastagens associadas a olival	 3.2.4.01.7 Florestas abertas de outras folhosas
	 3.2.4.02.3 Florestas abertas de outros carvalhos com folhosas

-  3.2.4.02.4 Florestas abertas de castanheiro com folhosas
-  3.2.4.02.6 Florestas abertas de espécies invasoras com folhosas
-  3.2.4.02.7 Florestas abertas de outra folhosa com folhosas
-  3.2.4.03.1 Florestas abertas de pinheiro bravo
-  3.2.4.03.3 Florestas abertas de outras resinosas
-  3.2.4.04.1 Florestas abertas de pinheiro bravo com resinosas
-  3.2.4.05.3 Florestas abertas de outros carvalhos com resinosas
-  3.2.4.05.4 Florestas abertas de castanheiro com resinosas
-  3.2.4.05.7 Florestas abertas de outra folhosa com resinosas
-  3.2.4.05.8 Florestas abertas de misturas de folhosas com resinosas
-  3.2.4.06.1 Florestas abertas de pinheiro bravo com folhosas
-  3.2.4.06.2 Florestas abertas de pinheiro manso com folhosas
-  3.2.4.06.3 Florestas abertas de outras resinosas com folhosas
-  3.2.4.07.1 Outras formações lenhosas
-  3.2.4.09.1 Cortes rasos de florestas de pinheiro bravo
-  3.2.4.10.1 Novas plantações de florestas de sobreiro
-  3.2.4.10.3 Novas plantações de florestas de outros carvalhos
-  3.2.4.10.4 Novas plantações de florestas de castanheiro
-  3.2.4.10.5 Novas plantações de florestas de eucalipto
-  3.2.4.10.7 Novas plantações de florestas de outras folhosas
-  3.2.4.11.1 Novas plantações de florestas de pinheiro bravo
-  3.2.4.11.3 Novas plantações de florestas de outras resinosas
-  3.2.4.13.1 Aceiros e/ou corta-fogos
-  3.3.1.01.1 Praias, dunas e areais interiores
-  3.3.2.01.1 Rocha nua
-  3.3.3.01.1 Vegetação esparsa
-  3.3.4.00 Área Ardida
-  3.3.4.01.1 Áreas ardidas não florestais
-  3.3.4.02.3 Áreas ardidas em florestas de outros carvalhos
-  3.3.4.02.6 Áreas ardidas em florestas de espécies invasoras
-  3.3.4.02.7 Áreas ardidas em florestas de outras folhosas
-  3.3.4.03.1 Áreas ardidas em florestas de pinheiro bravo
-  3.3.4.03.3 Áreas ardidas em florestas de outras resinosas
-  5.1.1.01.1 Cursos de água naturais
-  5.1.2.01.1 Lagos e lagoas interiores artificiais
-  5.1.2.01.2 Lagos e lagoas interiores naturais
-  5.1.2.02.1 Reservatórios de barragens
-  5.1.2.03.2 Charcas
-  5.1.2.03.3 Aquicultura interior

7. Bibliografia

- Adams, T. R., Richards, J., Penny, M. F., Phillips, D. M., Billard, B., Faulkner, D. W., Abbot, R. H., Wilsen, P. J., Cartwright, D. G., Perry, G. J., Rees, D., & Woodcock, B. (1986). Airborne laser hydrography in Australia. *Applied Optics*, Vol. 25, Issue 13, Pp. 2046-2058, 25(13), 2046–2058. <https://doi.org/10.1364/AO.25.002046>
- Antunes do Carmo, J. S. (2013). Grandes barragens: vulnerabilidades e riscos. *Riscos Naturais, Antrópicos e Mistos. Homenagem Ao Professor Doutor Fernando Rebelo*, 441–461.
- APA. (2022). *Atlas da Água - Factor de erosividade da precipitação - R (50.8 mm)*. <https://sniambgeoportal.apambiente.pt/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7BCB8B69E9-63C2-4BoD-9CD8-6756BE78B3Fo%7D>
- Arbestain, M., Macías, F., & Chesworth, W. (2008). Soil. Encyclopedia of Soil Science. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series* (p. Vol. XXVI).
- BERMÚDEZ, F.; RUIZ, J.; DIAZ, M.; FLÁNO, P.; FERNANDEZ, J. & LASANTA, T. (1993). Medidas de flujos de agua y sedimentos en parcelas experimentales. *Cuadernos Técnicos de La SEC, Sociedad E*.
- BONE, J., HEAD, M., BARRACLOUGH, D., ARCHER, M., SCHEIB, C., FLIGHT, D. & VOULVOULIS, N. (2010). Soil quality assessment under emerging regulatory requirement. *Environment International*, 104, 523–534.
- Bressan, D. (2010, July 20). *History of Geology: March 12, 1928: The geological induced collapse of the St. Francis Dam*. <http://historyofgeology.fieldofscience.com/2010/07/march-12-1928-geological-induced.html>
- Cantarino, I., Carrion, M. A., Goerlich, F., & Martinez Ibañez, V. (2019). A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps. *Landslides*, 16(2). <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4>
- Carlos Freire, M. (2018, November 23). *Marinha usa sonares em Borba. Mas será que resulta?* <https://www.dn.pt/pais/marinha-usa-sonares-em-borba-mas-sera-que-resulta-10226540.html>
- Clément Mathieu. (2019). *Photos : Il y a 60 ans à Fréjus, la tragédie du barrage de Malpasset*. Paris Match. <https://www.parismatch.com/Actu/Societe/Barrage-Frejus-Malpasset-1959-Archives-Photos-1662327#>

- CNT. (2015). *Recomendação Técnica Delimitação das Áreas de Elevado Risco de Erosão Hídrica do Solo*. 1–6.
http://cnt.dgterritorio.pt/sites/default/files/Recomendacao_Tecnica_CNT_AEREHS.pdf
- Coleman, N. M., Kaktins, U., & Wojno, S. (2016). Dam-Breach hydrology of the Johnstown flood of 1889—challenging the findings of the 1891 investigation report. *Heliyon*, 2(6).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00120>
- Copernicus. (2022). *European Ground Motion Service*. <https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>
- Coutinho, M. A., & Tomás, P. P. (1993). Estudo do parâmetro de erosividade da equação universal de degradação de solos. *CEHIDRO – Centro de Estudos de Hidrossistemas*.
- Cuven, S., Paris, R., Falvard, S., Miot-Noirault, E., Benbakkar, M., Schneider, J. L., & Billy, I. (2013). High-resolution analysis of a tsunami deposit: Case-study from the 1755 Lisbon tsunami in southwestern Spain. *Marine Geology*, 337, 98–111.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.02.002>
- Da Silva, M. A., Neto, L. B., Sieira, A. C. C. F., & Feijó, R. L. (2011). Previsão do risco de escorregamentos de taludes a partir de um Modelo Fuzzy. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 27(1), 59–75.
- Dave Petly. (2013, May 26). *Landslides and large dams - there may be trouble ahead...* The Landslide Blog. <https://blogs.agu.org/landslideblog/2013/05/26/landslides-and-large-dams-there-may-be-trouble-ahead/>
- DGT. (2010). *Cartografia de Uso e Ocupação do Solo (COS, CLC e Copernicus)*.
<https://www.dgterritorio.gov.pt/cartografia/cartografia-tematica/COS-CLC-COPERNICUS>
- Droneng. (2017). *O que são sistemas de referência e de coordenadas?* - DronEng.
<https://blog.droneng.com.br/geodesia-sistemas-de-referencia-e-de-coordenadas/>
- EchoLogger. (2022). *Single Frequency Echosounder (Shallow) | ECHOLOGGER EU400 & ECT400S*.
<https://www.echologger.com/products/single-frequency-echosounder-shallow>
- ESRI. (2020). *Sobre o ArcGIS | Ferramenta de Mapeamento e Análise*. <https://www.esri-portugal.pt/pt-pt/arcgis/sobre-o-arcgis/overview>
- Evers, F. M. (2017). *Spatial Propagation of Landslide Generated Impulse Waves*.
<https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000209471>
- Franzluebbbers, A., & Haney, R. (2006). *Assessing Soil Quality in Organic Agriculture. Critical Issue*

Report Soil Quality.

- Fugro. (2022). *Laser Airborne Depth Sounder (LADS) | Fugro*. <https://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/innovations/laser-airborne-depth-sounder-lads#tabbed3>
- Geotresnak. (2019). *FoxBathy*. http://www.geotresnak.shop/en_GB/shop/product/1207f001b-foxbathy-bathymetric-drone-87?category=26
- GRASS GIS. (2020). *History*. <https://grass.osgeo.org/about/history/releases/>
- HANS JENNY. (1994). *JENNY, H. (1994) - Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Foreword by AMUNDSON, R., Dover Publications, Inc., New York - Pesquisa Google*. https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSCConsumption/download?cid=nrcseprd1330210&text=pdf
- Heller, V., Hager, W. H., & Minor, H. E. (2009). Landslide generated impulse waves in reservoirs: Basics and computation. *Mitteilungen Der Versuchsanstalt Fur Wasserbau, Hydrologie Und Glaziologie an Der Eidgenossischen Technischen Hochschule Zurich*, 211.
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *O Manual de Deslizamento-Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos Serviço Geológico do Canadá*.
- History.com. (2009). *Over 2,000 die in the Johnstown Flood - HISTORY*. A&E Television Networks. <https://www.history.com/this-day-in-history/the-johnstown-flood>
- Hjulström, F., & Flodkvist, H. (1936). Studies of the Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. *Geografiska Annaler*, 18, 121. <https://doi.org/10.2307/519824>
- Huber, L. E., Evers, F. M., & Hager. (2017). *W.H. Solitary wave overtopping at granular dams*.
- Imeson, A., & Curfs, M. (2008). Erosão do Solo Erosão do Solo. *Land Care In Desertification Affected Areas*. <https://cordis.europa.eu/project/id/18347/reporting>
- José, N., & Grancho, R. (2005). *Origem e Evolução Recente dos Sistemas de Informação Geográfica em Portugal*.
- Julião, R., Nery, F., Ribeiro, J., Branco, M., & Zêzere, J. (2009). Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal. In *Autoridade Nacional de ...* [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Guia+metodol?gico+para+a+produ??o+de+cartografia+municipal+de+risco+e+para+a+cria??o+de+sistemas+de+informa??o+geogr?fica+\(SIG\)+de+base+municipal#o](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Guia+metodol?gico+para+a+produ??o+de+cartografia+municipal+de+risco+e+para+a+cria??o+de+sistemas+de+informa??o+geogr?fica+(SIG)+de+base+municipal#o)

- Karlena, K., Ditzlerb, G., & Andrews, S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114, 145–156.
- Kimpe, C. R. ; W. (1998). Soil functions and the future of natural resources. *Advances in Geoecology*, 31, 3–10. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19991901136>
- Knijff, J., Jones, R., & Montanarella, L. (2000). *Soil Erosion Risk. Assessment in Europe*.
- Kobel, J., Evers, F. M., & Hager. (2017). *W.H. Impulse wave overtopping at rigid dam structures*.
- KUIPERS, H. (1980). Proceedings of the Land Use Seminar on Soil Degradation. *Process in Physical Soil Degradation*, 7–20.
- LeCornu. (1998). *Water Scarcity and the Role of Storage in Development - Andrew A. Keller, R. Sakthivadivel, David William Seckler - Google Livros*. https://books.google.pt/books?id=NyW8kY86kEwC&pg=PA7&lpg=PA7&dq=LECORNU+1998&source=bl&ots=_wsuK4Lzvr&sig=ACfU3U1a_CZi41uWasZM8fE1JjVyXnTbyg&hl=pt-PT&sa=X&ved=2ahUKEwisje27jaX1AhUH8hQKHfFaD4IQ6AF6BAgNEAM#v=onepage&q=LECORNU 1998&f=false
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications* (2nd ed.). Wiley.
- Marendić, A., Paar, R., Tomić, H., & Roić, M. (2017). *Deformation monitoring of Kostanjek landslide in Croatia using multiple sensor networks and UAV*. https://www.researchgate.net/publication/325070466_Deformation_monitoring_of_Kostanjek_landslide_in_Croatia_using_multiple_sensor_networks_and_UAV
- Matos, J. (208 C.E.). *FUNDAMENTOS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA* (LIDEL (ed.); 5th ed.). <https://www.lidel.pt/pt/catalogo/engenharia-ciencias-da-terra/geomatica/fundamentos-de-informacao-geografica/>
- Michael. (2015). *Thingiverse*. <https://www.thingiverse.com/useful/designs>
- Minas, G. (2019). *Barragem da Vale se rompe em Brumadinho, MG | Minas Gerais | G1*. <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/bombeiros-e-defesa-civil-sao-mobilizados-para-chamada-de-rompimento-de-barragem-em-brumadinho-na-grande-bh.ghtml>
- Moore, I. D., & Nieber, J. L. (1989). Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution. *J. Minn. Acad. Sci.*, 55, 18–25.
- MRA. (2022). *AML Oceanographic Base-X*. <http://www.mra.pt/industria/produtos/tecnologias-marinhas-terrestres-e-ambientais/oceanografia/sistemas-batimetricos/perfiladores-de-velocidade-do-som/>

- Nascimento. (1974). Solos, rocha e terrenos de transição entre solos e rocha. *Conceitos Fundamentais, Serviços de Geotecnia*, 5–13.
- National Oceanography Centre. (2018). *Will climate change in the Arctic increase the landslide-tsunami risk to the UK?* | *Landslide-Tsunami Consortium*. <https://projects.noc.ac.uk/landslide-tsunami/project-information>
- Nyle Brady, R. W. (2008). *The Nature and properties of soils*. <http://www.tradingline.ro/sites/default/files/webform/pdf-the-nature-and-properties-of-soils-14th-edition-nyle-c-brady-ray-r-weil-pdf-download-free-book-2bc7e67.pdf>
- Oceanalpha. (2019). *ME120*. <https://www.oceanalpha.com/product-item/me120/>
- Olden, L. (1998). *Soil degradation: a threat to food security?*
- Painho, M., Jovani, I., & Curvelo, P. (2006). E-learning curricula search in geographical information systems and science. *Proceedings 2006 - The 9th AGILE International Conference on Geographic Information Science: "Shaping the Future of Geographic Information Science in Europe", AGILE 2006*.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., & Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2015.08.012>
- Paris, R., Goto, K., Goff, J., & Yanagisawa, H. (2020). *Advances in the study of mega-tsunamis in the geological record*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103381>
- Petróglifo de Bedólina*. (2015). http://www.laifi.com/usuario/70524/laifi/35530425_70524_17362002_4802.jpg
- Pimenta, M. T. (1998). Diretrizes para a Aplicação da Equação Universal de Perda dos Solos em SIG. *INAG, Lisbon, Portugal.*, 12.
- Porto de Setúbal - APSS, S. (2002). *Porto de Setúbal - APSS,SA - Homepage*. Porto de Setúbal - APSS,SA. <https://www.portodesetubal.pt/>
- Prof. Robert Boes. (2016). *How hydropower can deal with sediments* | *ETH Zurich*. ETH Zürich. <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2016/11/how-hydropower-can-deal-with-sediments.html>
- Ramalho, R. S., Winckler, G., Madeira, J., Helffrich, G. R., Hipólito, A., Quartau, R., Adena, K., & Schaefer, J. M. (2015). Hazard potential of volcanic flank collapses raised by new megatsunami evidence. *Science Advances*, 1(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500456>

- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1–4), 287–306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Ricketts, M. (2012). *The Malpasset Dam Disaster - could the Var suffer again?* Riviera Reporter. <http://www.rivierareporter.com/features/151-the-malpasset-dam-disaster-could-the-var-suffer-again>
- Rodrigues, F. (1997, May 1). *Fenda e fissura - Ciberdúvidas da Língua Portuguesa*. <https://ciberduvidas.iscte-iul.pt/consultorio/perguntas/fenda-e-fissura/747>
- Rosalind L. Helz. (2005). Monitoring Ground Deformation from Space. *USGS*. <http://earthquake.usgs.gov/products/>
- Roxo, M. J. (2000). *A Cultura do Trigo e a Degradação dos Solos na Margem Esquerda do Guadiana*.
- SAGA. (2020). *SAGA GIS*. <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html>
- Shih, K., Balachandran, A., Nagarajan, K., Holland, B., Slatton, C., & George, A. (2008). Fast real-time LIDAR processing on FPGAs. *Proceedings of the 2008 International Conference on Engineering of Reconfigurable Systems and Algorithms, ERSA 2008*.
- Shukla, M. K., LAL, R., & EBINGER, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Till*, 87, 194–204.
- Stoker, J. M., Brock, J. C., Soulard, C. E., Ries, K. G., Sugarbaker, L. J., Newton, W. E., Haggerty, P. K., Lee, K. E., & Young, J. A. (2016). USGS Lidar Science Strategy: Mapping the Technology to the Science. *U.S. Geological Survey*. <https://doi.org/10.3133/ofr20151209>
- Strasser, M., Hilbe, M., & Anselmetti, F. S. (2011). Mapping basin-wide subaquatic slope failure susceptibility as a tool to assess regional seismic and tsunami hazards. *Marine Geophysical Research*, 32(1). <https://doi.org/10.1007/s11001-010-9100-2>
- Subsea-tech. (2019). *Catarob*. <https://www.subsea-tech.com/catarob/>
- Tecdron. (2019). *CYBERJET 250*. <http://www.tecdron.com/en/technical-documents/>
- Tessema, N. N., Sigtryggsdóttir, F. G., Lia, L., & Jabir, A. K. (2019). Case Study of Dam Overtopping from Waves Generated by Landslides Impinging Perpendicular to a Reservoir's Longitudinal Axis. *Journal of Marine Science and Engineering* 2019, Vol. 7, Page 221, 7(7), 221. <https://doi.org/10.3390/JMSE7070221>
- Universitat, F. (2021). *Fluvial erosion*. Department of Earth Sciences. <https://www.geo.fu->

berlin.de/en/v/iwm-network/learning_content/environmental-background/fluvial_processes/fluvial_erosion/index.html

- USGS. (2021). *What is a landslide and what causes one?* USGS Natural Hazards. https://www.usgs.gov/faqs/what-a-landslide-and-what-causes-one?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products
- Vanneste, M., Forsberg, C. F., Glimsdal, S., Harbitz, C. B., Issler, D., Kvalstad, T. J., Løvholt, F., & Nadim, F. (2013). Submarine landslides and their consequences: What do we know, what can we do? *Landslide Science and Practice: Complex Environment*, 5(January), 5–17. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31427-8_1
- Waltham, T. (2018). St Francis: the world's worst dam site. *Geology Today*, 34(3). <https://doi.org/10.1111/gto.12229>
- Ward, S. N., & Day, S. (2010). The 1958 Lituya Bay landslide and tsunami a tsunami ball approach. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 4(4). <https://doi.org/10.1142/S1793431110000893>
- Weather Wiz Kids. (2021). *Landslides* | *Weather Wiz Kids*. http://www.weatherwizkids.com/?page_id=1326
- Wernly, J. F., Zajd Jr, H. J., & Coon, W. F. (2016). Bathymetric Survey and Estimation of Storage Capacity of Lower Sixmile Creek Reservoir, Ithaca, New York. *The Pembroke Publishing Service Center*, 26. <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20161157%0AWernly>
- Williams, J. R. (1975). *Sediment – yield prediction with universal equation using runoff energy factor*.
- Wingtra. (2021). *Drone photogrammetry vs. LIDAR: what sensor to choose for a given application* | *Wingtra*. <https://wingtra.com/drone-photogrammetry-vs-lidar/>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. *Fresenius Environmental Bulletin*, 537.
- Zamora, B. Z., Walstad, J. D., Radosevich, S. R., & Sandberg, D. V. (1993). Natural and Prescribed Fire in Pacific Northwest Forests. *Journal of Range Management*, 46(5), 470. <https://doi.org/10.2307/4002670>