

Desenvolvimento de um protótipo computacional para análise e cartografia automática da suscetibilidade a movimentos de vertente

Dissertação de Mestrado

Rui Filipe Fagundes Silva

Mestrado em

VULCANOLOGIA E RISCOS GEOLÓGICOS



Desenvolvimento de um protótipo computacional para análise e cartografia automática da suscetibilidade a movimentos de vertente

Dissertação de Mestrado

Rui Filipe Fagundes Silva

Orientadores

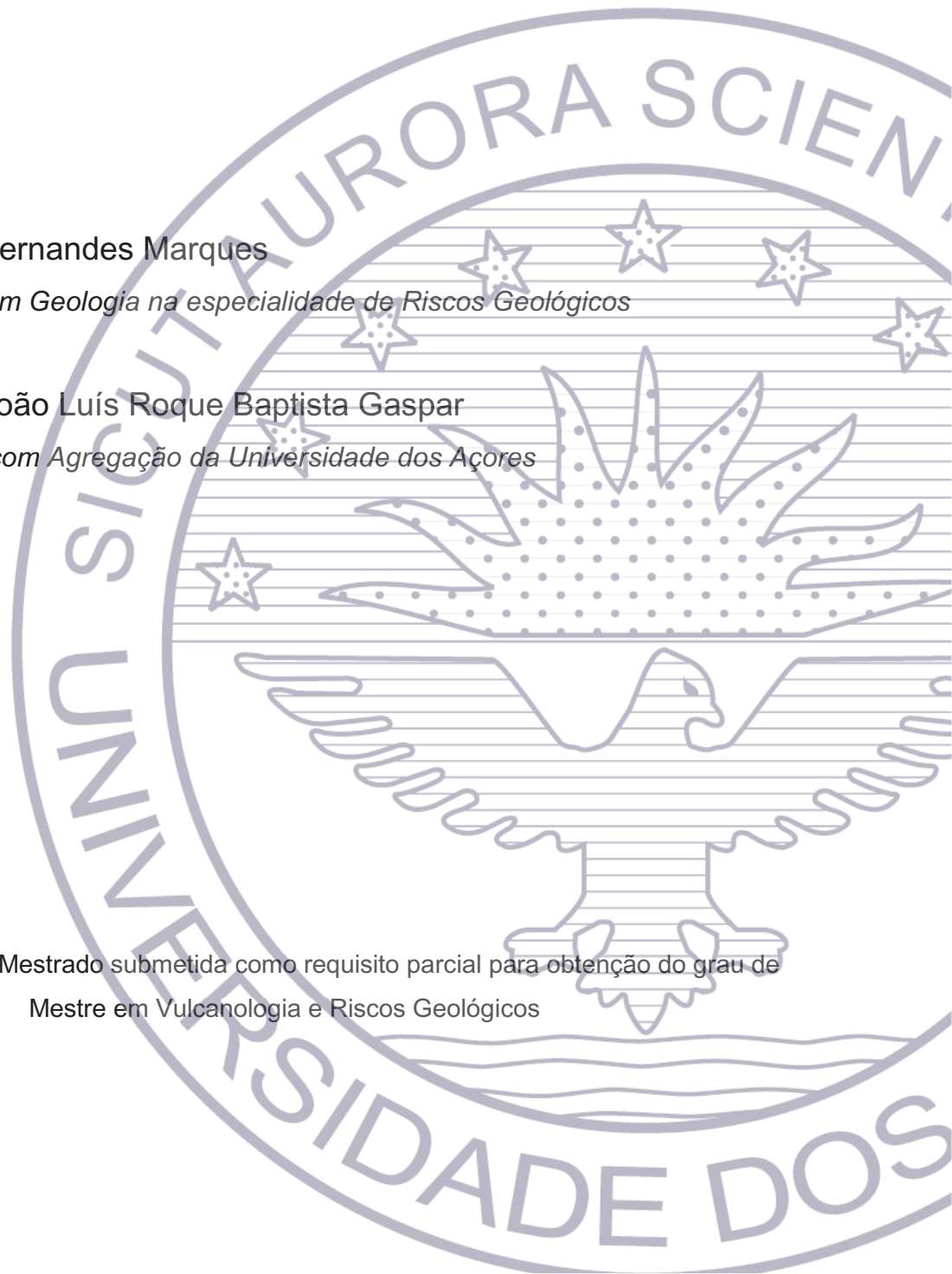
Doutor Rui Tiago Fernandes Marques

Geólogo, Doutorado em Geologia na especialidade de Riscos Geológicos

Professor Doutor João Luís Roque Baptista Gaspar

Professor Associado com Agregação da Universidade dos Açores

Dissertação de Mestrado submetida como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Vulcanologia e Riscos Geológicos



*À memória da minha avó,
Maria Lídia Bettencourt Fagundes*

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE TABELAS.....	V
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	VII
AGRADECIMENTOS.....	X
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO.....	1
1.2. OBJETIVOS GERAIS.....	2
1.3. ESTRUTURA ORGANIZACIONAL.....	3
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS GERAIS.....	5
2.1. ENQUADRAMENTO GERAL SOBRE INSTABILIDADE GEOMORFOLÓGICA.....	5
2.1.1. Terminologia: movimentos de vertente, terreno e massa.....	5
2.1.2. Tipologias.....	5
2.1.3. Fatores condicionantes e fatores desencadeantes.....	10
2.1.4. Modelo conceitual do risco.....	11
2.2. ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	12
2.2.1. Tipos de metodologias de análise da suscetibilidade.....	12
2.2.2. Dados de entrada para a modelação da suscetibilidade com base estatística/probabilística.....	13
2.2.3. Método de análise da suscetibilidade.....	15
2.2.4. Metodologia de validação.....	17
2.2.5. Classificação do mapa de suscetibilidade.....	18
2.3. ALGORITMIA E AUTOMATIZAÇÃO DE PROCESSOS.....	21

3. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO COMPUTACIONAL <i>ALSA-Tools</i>	23
3.1. <i>SOFTWARE</i> MATLAB.....	23
3.2. PROTÓTIPO DESENVOLVIDO EM MATLAB.....	24
3.2.1. Arquitetura da aplicação.....	24
3.2.2. Descrição dos componentes da aplicação.....	26
4. APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO COMPUTACIONAL <i>ALSA-Tools</i> : UM CASO DE ESTUDO NA FREGUESIA DO LAJEDO (ILHA DAS FLORES, AÇORES).....	35
4.1. ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO.....	35
4.1.1. Enquadramento geográfico e administrativo.....	35
4.1.2. Atividade geomorfológica histórica.....	37
4.1.3. Enquadramento geodinâmico.....	39
4.1.4. Caraterização demográfica.....	42
4.1.5. Caraterização geomorfológica e geológica.....	44
4.1.6. Caraterização da precipitação.....	51
4.1.7. Caraterização da rede hidrográfica.....	53
4.2. DADOS DE ENTRADA PARA A MODELAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE.....	54
4.2.1. Inventariação dos movimentos de vertente.....	54
4.2.2. Fatores de predisposição.....	57
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
4.3.1. Análise sensitiva dos fatores de predisposição.....	76
4.3.2. Ajuste dos modelos de suscetibilidade aos dados de entrada.....	78
4.3.3. Capacidade preditiva dos modelos de suscetibilidade.....	88
4.3.4. Classificação dos mapas finais.....	90

5. ANÁLISE DOS PLANOS E INSTRUMENTOS DE GESTÃO TERRITORIAL E AVALIAÇÃO DO RISCO
ESPECÍFICO 94

5.1. INSTRUMENTOS DE GESTÃO TERRITORIAL (IGT)	94
5.1.1 O risco nos Instrumentos de Gestão Territorial	95
5.1.2 Instrumentos de Gestão Territorial que regulamentam a área de estudo.	97
5.2. ELEMENTOS EXPOSTOS: TIPO E CATEGORIAS.....	105
5.3. AVALIAÇÃO DO RISCO ESPECÍFICO	107
CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
BIBLIOGRAFIA.....	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de um desabamento (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Wyoming State Geological Survey, [n.d.].....	6
Figura 2 Esquema de um balançamento (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Wyoming State Geological Survey, [n.d.].....	6
Figura 3 Esquema de um deslizamento rotacional (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Wyoming State Geological Survey, [n.d.].....	7
Figura 4 Esquema de um deslizamento translacional de rutura planar (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Wyoming State Geological Survey, [n.d.]	8
Figura 5 Esquema de uma escoada (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Wyoming State Geological Survey, [n.d.].....	9
Figura 6 Esquema de expansão lateral (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Highland e Bobrosky, 2008).....	9
Figura 7 Fatores responsáveis pela ocorrência de movimentos de vertente (adaptado de Popescu, 1994).....	10
Figura 8 Fluxograma com a sequência de etapas e <i>M-files</i> fundamentais da aplicação.	25
Figura 9 Aspeto de um ficheiro em formato texto correspondente a um fator de predisposição (exemplo da variável declive).	27
Figura 10 Aspeto de um ficheiro em formato texto correspondente a um inventário de movimentos de vertente (exemplo de inventário de desabamentos).	27
Figura 11 Fluxograma do <i>M-File Favorability.m</i>	28
Figura 12 Aspeto da tabela resumo guardada na pasta <i>tables_Fi</i> (exemplo da variável declive).	29
Figura 13 Fluxograma do <i>M-File Information Value.m</i>	29
Figura 14 Aspeto da tabela resumo guardada na pasta <i>tables_li</i> (exemplo da variável declive).	30
Figura 15 Aspeto do mapa com os valores de <i>li</i> guardado na pasta <i>maps_li</i> (exemplo da variável declive).	31
Figura 16 Aspeto do mapa com os valores de <i>lj</i> guardado na pasta <i>maps_lj</i> (exemplo de modelo com 12 fatores).	31
Figura 17 Fluxograma do <i>M-File Validation.m</i>	32

Figura 18 Aspeto do ficheiro de validação guardado na pasta <i>validation</i> (exemplo de modelo com 12 fatores).....	33
Figura 19 Fluxograma do <i>M-File Classification.m</i>	34
Figura 20 Aspeto do ficheiro de cálculo da Razão de Eficiência (exemplo de classificação por interpretação da curva de sucesso).....	34
Figura 21 Localização geográfica do Arquipélago dos Açores.	35
Figura 22 Enquadramento geográfico da área de estudo.....	36
Figura 23 Elementos morfotectónicos da região dos Açores (Hipólito, 2009).....	39
Figura 24 Localização dos sismos históricos no arquipélago dos Açores (Gaspar <i>et al.</i> , 2015).....	41
Figura 25 Localização das erupções vulcânicas históricas do arquipélago dos Açores (Gaspar <i>et al.</i> , 2015).....	41
Figura 26 Evolução demográfica da ilha das Flores entre 1864 e 2011.	42
Figura 27 Evolução demográfica da freguesia do Lajedo entre 1864 e 2011.	42
Figura 28 Carta geomorfológica da área de estudo (adaptado de Azevedo, 1999).....	44
Figura 29 Esboço vulcano-tectónico da área de estudo (Azevedo, 1999; Gaspar <i>et al.</i> , 1999).....	46
Figura 30 Precipitação acumulada anual e precipitação média anual para a Estação Meteorológica do Aeroporto da Ilha das Flores, considerando os períodos entre os anos 1979 - 1991 e 1997 - 2016.	51
Figura 31 Variação da precipitação média mensal para a Estação Meteorológica do Aeroporto da Ilha das Flores, considerando os períodos entre os anos 1979 - 1991 e 1997 - 2016.....	52
Figura 32 Bacias hidrográficas da área de estudo.....	53
Figura 33 Exemplos de desabamentos identificados e cartografados na área de estudo.	55
Figura 34 Exemplos de deslizamentos identificados e cartografados na área de estudo.	55
Figura 35 Distribuição espacial dos movimentos de vertente por tipologia cartografados na área de estudo.	56
Figura 36 Mapa hipsométrico para a área de estudo.....	59
Figura 37 Mapa de declive para a área de estudo.....	60
Figura 38 Mapa de exposição para a área de estudo.	62
Figura 39 Mapa do perfil longitudinal para a área de estudo.	63
Figura 40 Mapa do perfil transversal para a área de estudo.....	64
Figura 41 Mapa da área de contribuição para a área de estudo.....	66
Figura 42 Mapa do inverso do wetness index para a área de estudo.....	67
Figura 43 Mapa de insolação para a área de estudo.....	69

Figura 44 Mapa da distância aos cursos de água para a área de estudo.....	70
Figura 45 Mapa geológico para a área de estudo (Azevedo, 1999).....	72
Figura 46 Mapa da densidade de drenagem para a área de estudo.....	73
Figura 47 Mapa de usos do solo para a área de estudo.....	75
Figura 48 Curvas de sucesso para cada fator de predisposição para: (a) para desabamentos e (b) para deslizamentos.....	76
Figura 49 Curvas de Sucesso resultantes dos 4.095 modelos de suscetibilidade gerados: (a) para desabamentos e (b) para deslizamentos.....	79
Figura 50 SRC's dos modelos para desabamentos considerando: (a) 1 fator; (b) 2 fatores; (c) 3 fatores; (d) 4 fatores; (e) 5 fatores; (f) 6 fatores; (g) 7 fatores; (h) 8 fatores; (i) 9 fatores; (j) 10 fatores; (k) 11 fatores e (l) 12 fatores.....	81
Figura 51 SRC's dos modelos para deslizamentos considerando: (a) 1 fator; (b) 2 fatores; (c) 3 fatores; (d) 4 fatores; (e) 5 fatores; (f) 6 fatores; (g) 7 fatores; (h) 8 fatores; (i) 9 fatores; (j) 10 fatores; (k) 11 fatores e (l) 12 fatores.....	83
Figura 52 Ajuste dos modelos de suscetibilidade em função do número de fatores de predisposição usados em cada modelo para: (a) desabamentos e (b) deslizamentos.....	85
Figura 53 Variação do número de condições únicas esperadas e observadas em função do número de fatores de predisposição considerados em cada modelo.....	86
Figura 54 Variação da AUC e do número de condições únicas do terreno observadas em função do número de fatores de predisposição que constituem os modelos: (a) para desabamentos e (b) para deslizamentos.....	88
Figura 55 Curvas de predição resultantes dos 4095 modelos de suscetibilidade gerados: (a) para desabamentos e (b) para deslizamentos.....	89
Figura 56 Curvas de sucesso e predição dos melhores modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente: (a) para desabamentos e (b) para deslizamentos.....	90
Figura 57 Mapas finais de suscetibilidade considerando como critério de classificação a interpretação da curva de sucesso: para: (a) desabamentos e (b) deslizamentos.....	93
Figura 58 Mapas finais de suscetibilidade considerando como critério de classificação a separação das classes os tercis da área de estudo: para: (a) desabamentos e (b) deslizamentos.....	94
Figura 59 Distribuição espacial do edificado e da rede viária.....	106
Figura 60 Distribuição espacial da rede viária e do edificado classificado por tipo de utilização.....	106

Figura 61 Percentagem de a) edifícios e b) extensão de vias de comunicação localizados em cada classe de suscetibilidade a desabamentos.	107
Figura 62 Percentagem de a) edifícios e b) extensão de vias de comunicação localizados em cada classe de suscetibilidade a deslizamentos.....	108
Figura 63 Percentagem e número de edifícios por tipologia localizados em cada classe de suscetibilidade a desabamentos.	109
Figura 64 Percentagem de vias de comunicação por tipologia localizados em cada classe de suscetibilidade a desabamentos.	109
Figura 65 Risco específico à rutura de desabamentos dos elementos expostos na área de estudo...110	
Figura 66 Risco específico à rutura de desabamentos dos elementos expostos na área de estudo (pormenor).	110
Figura 67 Percentagem e número de edifícios por tipologia localizados em cada classe de suscetibilidade a deslizamentos.	112
Figura 68 Percentagem de vias de comunicação por tipologia localizados em cada classe de suscetibilidade a deslizamentos.....	112
Figura 69 Risco específico à rutura de deslizamentos dos elementos expostos na área de estudo....113	
Figura 70 Risco específico à rutura de deslizamentos dos elementos expostos na área de estudo (pormenor)	113

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Classificação de curvas de modelos com base no cálculo das áreas abaixo da curva (AAC's), de acordo com Guzzetti (2005).	18
Tabela 2 Escala qualitativa da capacidade preditiva das classes de suscetibilidade, com base na Razão de Eficiência (rEi).	20
Tabela 3 Escala vulcanoestratigráfica para a ilha das Flores (Azevedo e Portugal Ferreira, 2006).	47
Tabela 4 Resumo do inventário de movimentos de vertente.	56
Tabela 5 Resumo dos fatores de predisposição utilizados na avaliação da suscetibilidade de movimentos de vertente em trabalhos realizados para o arquipélago dos Açores.	58
Tabela 6 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de altitude e respetivos valores de favorabilidade.	59
Tabela 7 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de declive e respetivos valores de favorabilidade.	61
Tabela 8 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de exposição e respetivos valores de favorabilidade.	62
Tabela 9 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe do perfil longitudinal e respetivos valores de favorabilidade.	64
Tabela 10 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe do perfil transversal e respetivos valores de favorabilidade.	65
Tabela 11 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe da área de contribuição e respetivos valores de favorabilidade.	66
Tabela 12 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe do inverso do <i>wetness index</i> e respetivos valores de favorabilidade.	68
Tabela 13 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de insolação e respetivos valores de favorabilidade.	69
Tabela 14 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe da distância aos cursos de água e respetivos valores de favorabilidade.	71
Tabela 15 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de geologia e respetivos valores de favorabilidade.	72
Tabela 16 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe da densidade de drenagem e respetivos valores de favorabilidade.	74

Tabela 17 Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de usos do solo e respetivos valores de favorabilidade.	75
Tabela 18 Valores das áreas abaixo das curvas de sucesso e respetivas hierarquizações de cada um dos fatores de predisposição para cada tipologia.	77
Tabela 19 Número de modelos de suscetibilidade obtidos com diferentes números de fatores de predisposição.	78
Tabela 20 Resumo das características da partição dos grupos de movimentos de vertente.	88
Tabela 21 Razão de eficiência (rEi) das classes de suscetibilidade do mapa desenvolvido considerando como critério de separação das classes os tercis da área de estudo para desabamentos.	91
Tabela 22 Razão de eficiência (rEi) das classes de suscetibilidade do mapa desenvolvido considerando como critério de separação das classes os tercis da área de estudo para deslizamentos.	91
Tabela 23 Razão de eficiência (rEi) das classes de suscetibilidade do mapa classificado por interpretação da curva de sucesso para desabamentos.	91
Tabela 24 Razão de eficiência (rEi) das classes de suscetibilidade do mapa classificado por interpretação da curva de sucesso para deslizamentos.	92
Tabela 25 Instrumentos de Gestão Territorial que regulamentam a freguesia do Lajedo.	97
Tabela 26 Número de edifícios de acordo com o tipo de utilização.	105

LISTA DE ACRÓNIMOS

AAC – Área abaixo da curva

ACT – Área de contribuição (fator de predisposição)

ALSA-Tools – Automatic Landslide Susceptibility Analysis - Tools

ALT – Altitude (fator de predisposição)

CB – Complexo de Base (geologia)

CIVISA – Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores

CMA – Crista Média Atlântica

CRV – Curvatura (fator de predisposição)

CS – Complexo Superior (geologia)

DCA – Distância aos cursos de água (fator de predisposição)

DDR – Densidade de drenagem (fator de predisposição)

DEC – Declive (fator de predisposição)

DECISIONLARM – Desenvolvimento e implementação de um sistema de apoio à decisão para alerta e alarme a movimentos de vertente com o recurso à monitorização cinemática e hidrológica e à modelação hidrológica e geotécnica

DEP – Distância ao epicentro (fator de predisposição)

DQA – Diretiva Quadro da Água

DSB – Desabamento

DSB-MOD – Grupo de desabamentos de modelação

DSB-TOT – Grupo correspondente à totalidade de desabamentos

DSB-VAL – Grupo de desabamentos de validação

DSCIG-SRCTE – Direção de Serviços de Cartografia e Informação Geográfica – Secretaria Regional da Ciência, Tecnologia e Equipamentos

DSL – Deslizamento

DSL-MOD – Grupo de deslizamentos de modelação

DSL-TOT – Grupo correspondente à totalidade de deslizamentos

DSL-VAL – Grupo de deslizamentos de validação

eR – Razão de Eficiência
EU – Eurasiática (placa tectónica)
EXP– Exposição (fator de predisposição)
FG – Falha GLORIA
GEO – Geologia (fator de predisposição)
IGT – Instrumento de Gestão Territorial
INS – Insolação (fator de predisposição)
IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IVAR – Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos
IWI – Inverso do Wetness Index (fator de predisposição)
LBPOTU – Lei de Bases da Política de Ordenamento do Território e de Urbanismo
LIT – Litologia (fator de predisposição)
LREC – Laboratório Regional de Engenharia Civil
MNE – Modelo Numérico de Elevação
MV – Movimento de vertente
MV-TOT – Grupo correspondente à totalidade dos movimentos de vertente
NA – Norte Americana (placa tectónica)
NU – Núbia (placa tectónica)
PDM – Plano Diretor Municipal
PEOT – Planos Especiais de Ordenamento do Território
PGRH – Açores – Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores
PLG – Perfil longitudinal talude (fator de predisposição)
PMOT – Plano Municipal de Ordenamento do Território
PNPOT – Programa Nacional de Política de Ordenamento do Território
POOC – Plano de Ordenamento da Orla Costeira
POTRAA – Plano de Ordenamento Turístico da Região Autónoma dos Açores
PRA – Plano Regional da Água da Região Autónoma dos Açores
PRE – Precipitação (fator de predisposição)
PRC – Curva de predição (Prediction Rate Curve)

PROTA – Plano Regional de Ordenamento do Território dos Açores
PTR – Perfil transversal do talude (fator de predisposição)
RAR – Reserva Agrícola Regional
RT – Rift da Terceira
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SRC – Curva de Sucesso (Success Rate Curve)
TIN – Triangulated Irregular Network
TPI – Topographic Position Index (fator de predisposição)
UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USO – Uso do solo (fator de predisposição)
UT – Unidade de terreno
VI – Valor Informativo (método estatístico)
WP/WLI – Working Party on World Landslide Inventory
ZFNA – Zona de Fratura Norte dos Açores

AGRADECIMENTOS

Com a conclusão desta dissertação de mestrado cumpre-me expressar a minha gratidão a todos aqueles que com os seus contributos ajudaram a alcançar mais este objetivo. Agradeço:

- À Universidade dos Açores como instituição de acolhimento, pelas facilidades concedidas;
- Ao diretor do Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR), professor doutor José Pacheco e à sua ex-diretora, professora doutora Gabriela Queiroz, ao presidente do Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA), doutor Rui Marques e à sua ex-presidente, professora doutora Teresa Ferreira, pelas condições proporcionadas para a concretização deste trabalho;
- Ao doutor Rui Marques, orientador científico deste projeto de mestrado, pelos ensinamentos transmitidos, pela disponibilidade na revisão e apreciação crítica, nos comentários, nas sugestões, na cedência de bibliografia, no esclarecimento de dúvidas, na alegria, na amizade e na dedicação prestada, que ajudaram a desenvolver a presente dissertação;
- Ao professor doutor João Luís Gaspar, orientador científico deste projeto de mestrado, pelo seu incentivo, colaboração, revisão de textos, disponibilidade e empenho que dedicou à minha formação e que conduziram à concretização deste trabalho;
- Ao Eng. Luís Serpa, pelo auxílio no trabalho de campo para inventariação dos movimentos de vertente, pela constante disponibilidade e partilha de conhecimentos acerca da freguesia do Lajedo;
- Aos colegas e amigos de mestrado Ana Oliveira, Joana Medeiros, João Couto, João Ferro, Nuno Ferreira, Rafael Branco, Rodrigo Arruda, Simone Aguiar e Sandro Matos, pelos bons momentos de convívio, de diversão e de partilha de ideias;
- Aos amigos Arturo Garcia, Flávio Soares, Francisco Ferreira, Mercês Mota e Rita Marques, pela amizade e interesse demonstrados;
- Aos amigos e colegas da UCO de Hidrometeorologia, Paulo Pacheco e Bruno Medeiros, pela amizade, partilha de ensinamentos e ideias, durante as horas de “debate”;

- A todos os funcionários e investigadores do Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA) e do Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR), agradeço a amizade;

- Aos companheiros e amigos da Tuna Académica da Universidade dos Açores (TAUA), por serem a minha segunda família; pelos momentos inesquecíveis, recordações de viagens, atuações e convívios, que guardo comigo;

- Por último, mas sempre em primeiro lugar, aos meus pais, irmãos, avós e a toda a família por todo o apoio na minha formação, progressão académica e confiança que depositam em mim.

RESUMO

A utilização de linguagens de programação para a criação e automatização de processos torna possível analisar e avaliar a sensibilidade de algoritmos relativamente à introdução de diferentes dados de entrada e/ou à alteração de parâmetros de modelação. Tais processos tendem a criar uma quantidade muito elevada de resultados, que dificilmente poderiam ser produzidos e analisados através de métodos mais tradicionais.

Neste sentido, foi criado e testado um protótipo computacional, desenvolvido em linguagem MATLAB, denominado por *ALSA-Tools (Automatic Landslide Susceptibility Analysis - Tools)*, que permitiu a análise e produção de cartografia automática da suscetibilidade a movimentos de vertente, baseado no método estatístico bivariado Valor Informativo. Face à automatização de processos e à possibilidade de criar pequenas alterações ao nível da modelação, foi possível compreender e quantificar os efeitos e a variabilidade dos resultados da análise da suscetibilidade promovidos pela: i) discriminação (ou não) da tipologia de movimentos de vertente; ii) utilização de diferentes combinações de fatores de predisposição; e iii) incapacidade do território produzir condições únicas de terreno a partir de determinado número de fatores de predisposição adicionados aos modelos, e conseqüente incapacidade de melhorar a qualidade do ajuste dos modelos aos dados de entrada.

Para testar o protótipo computacional foi selecionada uma área que corresponde, *grosso modo*, à freguesia do Lajedo, na ilha das Flores, arquipélago dos Açores, onde recorrentemente se têm registado fenómenos danosos de instabilidade geomorfológica. Para a análise da suscetibilidade a movimentos de vertente foram identificadas e cartografadas, com base em trabalhos de campo e de gabinete, 474 áreas de rutura de movimentos de vertente, das quais 171 correspondem a desabamentos e 303 a deslizamentos, e considerados 12 fatores de predisposição.

A hierarquização efetuada aos diferentes fatores de predisposição, relativamente à sua capacidade para discriminar o território quanto à propensão para a ocorrência de movimentos de vertente, demonstrou que o declive e a geologia correspondem aos fatores que possuem maior capacidade individual de discriminar o território para ambas as tipologias de movimento de vertente consideradas. Os restantes fatores de predisposição apresentam uma maior variabilidade desta capacidade com a tipologia de movimento de vertente considerada, comprovando a existência de relações diferenciadas entre as diferentes tipologias e os fatores de predisposição.

Com a aplicação *ALSA-Tools* foi possível aplicar o método do Valor Informativo a todas as 4.095 combinações de fatores de predisposição possíveis para cada tipologia. Concluiu-se que, para a área de estudo, a combinação de fatores que apresenta melhores resultados para ambas as tipologias foi desenvolvida com apenas sete fatores de predisposição. Adicionalmente, verificou-se que este conjunto de fatores não é composto pelos sete fatores de predisposição que apresentam individualmente melhor capacidade de discriminar o território relativamente à suscetibilidade, mas sim por uma combinação de fatores que apresentam muita heterogeneidade relativamente a esta capacidade.

Com o *ALSA-Tools* foi efetuado o estudo da variação dos valores de área abaixo da curva das curvas de sucesso e do número de condições únicas de terreno observadas e esperadas de acordo com o número de fatores de predisposição que constituem cada modelo. Tal permitiu demonstrar a incapacidade de o território gerar invariavelmente novas condições únicas de terreno com a sucessiva adição de fatores de predisposição, estando tal condicionalismo diretamente relacionado com a impossibilidade de se melhorar a qualidade do ajuste dos modelos aos dados de entrada, com a adição de novos fatores de predisposição.

Os modelos com melhor qualidade para cada tipologia foram validados através da definição de curvas de predição e respetivas áreas abaixo da curva, tendo sido confirmada a robustez estatística do inventário e a boa capacidade preditiva dos modelos. No caso dos desabamentos foi determinado um valor de área abaixo da curva de predição de 0,84 e para os deslizamentos de 0,79.

A análise realizada aos IGT que regulamentam a área de estudo incidiu sobre a presença ou ausência de componentes de caracterização do perigo e/ou análise da perigosidade e/ou risco de movimentos de vertente. Concluiu-se que a maioria dos IGT relevam a importância da avaliação dos riscos naturais sem, no entanto, incluir qualquer cartografia de suscetibilidade, perigosidade ou risco que delimite áreas com maior ou menor propensão para a ocorrência deste tipo de fenómenos.

Neste sentido, foi realizada a avaliação do risco específico à rutura de desabamentos e deslizamentos. Para o caso da rutura de desabamentos, concluiu-se não existir nenhum edifício na classe de suscetibilidade elevada e apenas 1,7% da extensão das vias de comunicação estão abrangidas nesta classe. Quanto à rutura de deslizamentos, verifica-se que 22,4% dos edifícios se encontram em áreas com suscetibilidade elevada e que 36% da extensão das vias de comunicação se encontra nesta classe.

Palavras-chave: MATLAB; Programação; Automatização de Processos; Análise de Suscetibilidade; Movimentos de Vertente; Açores.

ABSTRACT

The use of programming languages for the creation and automation of processes makes possible to analyze and evaluate the sensitivity of algorithms relatively to the introduction of different input data and/or the changing of modeling parameters. Such processes tend to create a very high number of results, which could hardly be produced and analyzed by traditional methods.

In this context, it was created and tested a computational prototype, developed in MATLAB language, denominated by ALSA-Tools (Automatic Landslide Susceptibility Analysis - Tools), which allowed the analysis and production of landslide susceptibility automatic cartography, based on the statistical method bivariate Informative Value. Due to the automation of processes and the possibility of creating minor changes in the of modeling, it was possible to better understand and quantify the consequences and the variability pertaining to the goodness of fit of landslide susceptibility models caused by: (i) the discrimination (or not) of landslide typology; (ii) the use of different predisposing factor combinations; and (iii) the inability of the territory to generate new observed unique terrain conditions and consequent inability to increase the goodness of fit of the computed models.

In order to test the computational prototype, was selected an area which correspond, roughly, the Lajedo parish in the Flores Island (Azores), where damaging of geomorphological instability have been recurrent recorded. For the landslide susceptibility analysis, 474 landslides rupture areas were identified and mapped, based on field and office works, 171 of which are slides and 303 of which are falls, and was considered 12 predisposition factors.

The hierarchisation of the different predisposition factors, in relation to their ability to discriminate the territory as to the propensity for the occurrence of landslides, allow us to conclude that the slope and geology have importance in the spatial discrimination of the areas where both landslide typologies occur. The others predisposition factors presented a greater variability of this capacity with the landslide typology considered, evidencing the existence of differentiated relations between the different typologies and predisposition factors.

With the ALSA-Tools application it was possible to apply the Information Value method to all 4,095 combinations of possible predisposition factors for each typology. It was concluded that, for the study area, the combination of factors that presented the best results for both types was developed with only seven predisposition factors. Additionally, was verified that these models are not exclusively the result of a

combination of predisposing factors with the best spatial discrimination capacity, but rather are formed by a combination of factors with heterogeneous degrees of discriminative capacity.

With ALSA-Tools, was studied the variation of the area under the curve of the success rate curve and the number of observed and expected unique terrain conditions, according to the number of predisposing factors used in each model. Such allowed demonstrate that the inability of the territory to generate new unique conditions with the addition of predisposing factors clearly decreases the variability of the results and increases the goodness of fit of the susceptibility models.

The predictive capacity of the best susceptibility models was assessed by computing the prediction rate curves and the area under the curve, confirming the statistical robustness of the inventory and the good predictive capacity of the models. For the falls and slides was determined a value of area under the curve of the prediction rate curve of 0.84 and 0.79, respectively.

The analysis of the Territorial Management Instruments that regulate the study area was focused on the presence or absence of components of hazard analysis and/or risk of landslides. It was concluded that the majority of Territorial Management Instruments stress the importance of natural risk assessment without, however, including any susceptibility, hazard or risk mapping that delimits areas with a greater or lesser propensity for this type of phenomena.

In this way, the specific risk assessment for each typology of landslides rupture resulted from the overlapping of vulnerability elements with the susceptibility maps. As a result of the specific risk assessment of falls rupture, it was concluded that there were no buildings in areas of high susceptibility and, therefore, the specific risk is low. However, it is verified that 1,7% of roads were located in areas of high susceptibility. As a result of the specific risk assessment of slides rupture, 22,4% of buildings were located in areas of high susceptibility, and 36% of the extension of road network were in the highest susceptibility class.

Keywords: MATLAB; Programming; Automation of Processes; Susceptibility Analysis; Landslides; Azores.

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

Os movimentos de vertente são responsáveis por impactos económicos e sociais significativos em muitas áreas do mundo. Este fenómeno causa recorrentemente morte de pessoas e animais, destruição ou danos em infraestruturas residenciais e industriais e em áreas agrícolas (e.g., Schuster, 1996; Schuster e Highland, 2001). A localização geográfica e o enquadramento geodinâmico do arquipélago dos Açores propiciam a ação de diversos perigos naturais, entre os quais se destacam os fenómenos de instabilidade geomorfológica. Diversos documentos, contemporâneos e históricos, relatam a ocorrência destes fenómenos associados a diferentes fatores desencadeantes como sismos, erupções vulcânicas ou episódios de precipitação intensa, muitos deles com elevado impacto socioeconómico no arquipélago.

Os movimentos de vertente no arquipélago dos Açores, tal como em outras regiões vulcânicas e insulares, constituem assim um dos perigos geológicos mais frequentes devido aos condicionalismos naturais aí observados. Alguns autores têm vindo a desenvolver estudos relacionados com a avaliação do risco através de métodos estatísticos/probabilísticos para a análise da suscetibilidade, nomeadamente Marques *et al.* (2007, 2009 e 2015) e Marques (2013), e métodos determinísticos, nomeadamente Amaral *et al.* (2009) e Amaral (2010). Assim, a identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de movimentos de vertente é essencial para mitigar o risco, para o ordenamento do território e para o planeamento de emergência e, portanto, uma importante contribuição para a segurança das pessoas e bens (Guzzetti *et al.*, 1999).

A avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente pode ser efetuada com recurso a diferentes métodos (Guzzetti *et al.*, 1999; Crozier e Glade, 2005). Os métodos estatísticos e probabilísticos, estão entre os mais utilizados para a avaliação da suscetibilidade e baseiam-se nas relações entre os fatores de predisposição e a distribuição espacial dos movimentos de vertente. A avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente corresponde à base de qualquer mapeamento de risco.

O desenvolvimento de modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente foi melhorado na última década devido ao desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e ao aumento do poder computacional. Atualmente, ao contrário de há uma década atrás, é possível a integração de diferentes tipos e formatos de dados de entrada, o uso de modelos de terreno de alta definição, a utilização de um elevado número de fatores de predisposição e a análise simultânea de áreas maiores.

Para a mesma área de estudo podem ser obtidos diferentes mapas de suscetibilidade e os resultados produzidos são dependentes de vários fatores. Alguns estudos sobre a análise de suscetibilidade a movimentos de vertente exploraram essa variabilidade e incertezas (e.g., Thiery *et al.*, 2007; Felicísimo *et al.*, 2013; Steger *et al.*, 2016; Zêzere *et al.*, 2017; Steger e Glade, 2017), com base: i) em erros nos inventários de movimentos de vertente, derivados do processo cartográfico; ii) na influência do método estatístico aplicado; iii) na forma de representar os movimentos de vertente (polígonos *versus* pontos); iv) na discriminação dos movimentos de vertente por tipologia; v) na combinação de diferentes fatores de predisposição; vi) no tipo e dimensão da unidade de terreno (UT); e vii) na influência da restrição dos modelos de suscetibilidade a setores específicos (com maior densidade de movimentos de vertente) da área de estudo.

Comum aos trabalhos supramencionados é a utilização de diferentes ferramentas informáticas para a obtenção de resultados cuja integração obriga a procedimentos de compatibilização de dados, por vezes morosos, entre diferentes aplicações. A arquitetura, o desenvolvimento e o estabelecimento de processos e de fluxos de trabalho, bem como o desenvolvimento de tecnologia, correspondem às bases que norteiam a noção moderna de gestão organizacional. A criação e automatização de processos agilizam a obtenção de resultados, minimizando o tempo, custo e recursos despendidos.

A automatização de processos e de fluxos de trabalho desempenham um papel cada vez mais importante na economia global. A combinação de diferentes ferramentas matemáticas em processos automatizados possibilita a criação de sistemas complexos que podem ser aplicados à avaliação de riscos naturais, designadamente ao risco de movimentos de vertente. Tais sistemas podem ser utilizados no âmbito do ordenamento do território e do planeamento de emergência, podendo traduzir-se num aumento da produtividade, redução de custos e melhoria da qualidade dos resultados finais, uma vez que reduz a interferência do operador e com isto a diminuição de erros associados aos procedimentos utilizados na avaliação do risco.

1.2. OBJETIVOS GERAIS

A presente dissertação está inserida no projeto DECISIONLARM - “Desenvolvimento e implementação de um sistema de apoio à decisão para alerta e alarme a movimentos de vertente com o recurso à monitorização cinemática e hidrológica e à modelação hidrológica e geotécnica” (ACORES - 01- 0145 – FEDER - 000055), suportado pelo Programa Operacional dos Açores 2020. O projeto é da responsabilidade

do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) em co-promoção com o Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA).

O trabalho apresentado tem como objetivo principal o desenvolvimento e aplicação de um protótipo informático, em linguagem MATLAB, que visa a produção de cartografia de suscetibilidade a movimentos de vertente, através da aplicação do método estatístico bivariado do Valor Informativo, considerando no essencial as seguintes etapas: i) desenvolvimento dos modelos de suscetibilidade, incluindo estudo da influência dos diferentes fatores de predisposição e das suas combinações na qualidade dos modelos; ii) validação dos algoritmos; iii) produção de cartografia de suscetibilidade; e iv) classificação do mapa de suscetibilidade final.

Neste sentido, é possível entender e quantificar melhor as consequências na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente causadas: i) por discriminar (ou não) a tipologia de movimentos de vertente; ii) por usar diferentes combinações de fatores de predisposição; iii) pelo peso individual de cada fator de predisposição no resultado final; e iv) pela influência do número de condições de terreno observadas, geradas por diferentes combinações de fatores de predisposição, e a sua influência na melhoria da qualidade do ajuste dos modelos de suscetibilidades gerados.

A freguesia do Lajedo, na ilha das Flores, é um dos locais no arquipélago dos Açores recorrentemente afetado por movimentos de vertente. Assim, face à recorrência deste tipo de fenómeno ao longo do tempo, esta freguesia constitui uma área de estudo por excelência para o desenvolvimento de trabalhos no âmbito da instabilidade de vertentes, sendo o caso de estudo da presente dissertação.

Com base nos resultados obtidos, é efetuada a classificação dos elementos de vulnerabilidade em conformidade com a suscetibilidade do território na área de estudo e uma análise crítica aos planos e instrumentos de gestão territorial em vigor naquela área.

1.3. ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

Para satisfazer os objetivos definidos, esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos, sendo o primeiro correspondente à introdução.

No capítulo 2 apresenta-se os fundamentos teóricos gerais acerca do estudo dos movimentos de vertente, no qual se inclui uma breve abordagem às terminologias, classificações, tipologias e causas. Neste capítulo são também apresentados os diferentes tipos de metodologias de análise da suscetibilidade e uma breve introdução à automatização e otimização de processos.

O capítulo 3 aborda o desenvolvimento do protótipo para a automatização de processos e de fluxos de trabalho necessários à cartografia de suscetibilidade a movimentos de vertente. Neste capítulo é apresentada e explorada a arquitetura e os componentes da aplicação, bem como a descrição funcional de cada módulo.

O capítulo 4 é dedicado à aplicação do protótipo desenvolvido no capítulo anterior, na área de estudo selecionada: freguesia do Lajedo (ilha das Flores, Açores). Neste capítulo é feito o enquadramento geográfico, geodinâmico, geomorfológico, meteorológico, geológico e hidrográfico da área de estudo, bem como a caracterização demográfica, das infraestruturas e das vias de comunicação. São explorados o inventário de movimentos de vertente realizado e os fatores de predisposição utilizados na modelação. São apresentados os resultados obtidos que irão permitir analisar a influência de diferentes fatores de predisposição e das suas possíveis combinações na qualidade dos algoritmos, validar os algoritmos com base na determinação de curvas de sucesso e curvas de predição e respetivas áreas abaixo da curva, identificar o algoritmo que apresenta a melhor capacidade de ajuste aos dados de entrada e a melhor capacidade preditiva para a elaboração do mapa de suscetibilidade final, bem como classificar o mapa final.

No capítulo 5 apresenta-se a classificação dos elementos expostos em conformidade com a suscetibilidade a movimentos de vertente, tendo por base o mapa final produzido no capítulo 4. Ainda neste capítulo expõem-se uma análise crítica às componentes de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente presentes nos planos e instrumentos de gestão territorial em vigor na área de estudo.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS GERAIS

2.1. ENQUADRAMENTO GERAL SOBRE INSTABILIDADE GEOMORFOLÓGICA

2.1.1. Terminologia: movimentos de vertente, terreno e massa

O trabalho de uniformização dos métodos de inventariação e a terminologia utilizada no estudo de movimentos de vertente foi realizada pelo grupo de trabalho da UNESCO, designado por *Working Party on World Landslide Inventory* (WP-WLI, 1993a, 1993b).

A WP-WLI, a partir da proposta de Cruden (1991), define movimento de vertente (*landslide*) como “movimento de descida, numa vertente, de uma massa de rocha ou solo.” O termo exclui os movimentos verticais de abatimento e assentamento (subsidência), as avalanches de neve e os efeitos da expansão e retração de solos argilosos.

De acordo com Flageollet (1989), a definição de movimento de terreno abrange “todas as formas de deslocação que se podem verificar (abatimentos, desabamentos, deslizamentos, escoadas, etc.) e todos os materiais que podem ser colocados em movimento”, o que implica a rutura e o movimento simultâneo da massa afetada. Esta designação inclui todos os tipos de movimentos de vertente, deslocações com dominante vertical (abatimentos e assentamentos) e movimentos associados à expansão e retração de solos argilosos, excluindo o *creep* e todos os movimentos associados à neve e ao gelo.

A designação movimentos de massa é a mais ampla, abrangendo os movimentos de terreno e os movimentos associados ao gelo e à neve. Segundo Hutchinson (1968), “os movimentos de massa compreendem todos os movimentos induzidos pela gravidade, com exclusão daqueles em que o material é mobilizado por um agente de transporte como o gelo, neve, água ou ar, designados por transporte em massa.”

2.1.2. Tipologias

A classificação utilizada neste trabalho baseia-se nos critérios definidos por Varnes (1978) e WP/WLI (1993b), na qual os movimentos de vertente são classificados de acordo com o tipo de mecanismo e em função do tipo de material afetado. Consideram-se como diferentes tipologias de movimentos de vertente: desabamentos (*falls*), deslizamentos (*slides*), escoadas (*flows*), balançamentos (*topples*) e expansões laterais (*lateral spreads*).

Desabamento

Um desabamento (*fall*, Figura 1) é definido como “uma deslocação de solo ou rocha a partir de um abrupto, ao longo de uma superfície onde os movimentos tangenciais são nulos ou reduzidos. O material desloca-se predominantemente pelo ar, por queda, saltação ou rolamento” (WP-WLI, 1993b).

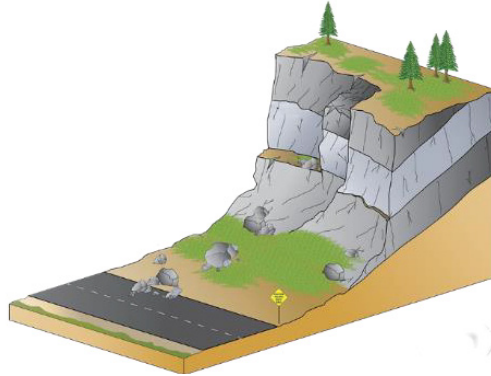


Figura 1 | Esquema de um desabamento (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Wyoming State Geological Survey, [n.d.]

Balançamento

Um balançamento (*topple*, Figura 2) caracteriza-se por “uma rotação de uma massa de solo ou rocha, a partir de um ponto ou eixo situado abaixo do centro de gravidade da massa afetada” (WP-WLI, 1993b). Este movimento de vertente ocorre pela ação gravítica que as massas de solo ou rocha exercem na vertente localizadas a montante da massa deslocada, pelas forças laterais exercidas pelos materiais e fluídos que preenchem as fraturas e diáclases e pelo efeito que a água e o gelo podem exercer nas fraturas que existem na vertente (Cruden e Varnes, 1996).

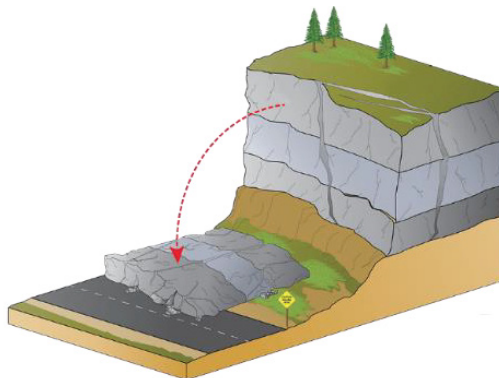


Figura 2 | Esquema de um balançamento (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Wyoming State Geological Survey, [n.d.]

Deslizamento

Um deslizamento (*slide*) corresponde a um “movimento de solo ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de planos de rutura ou de zonas relativamente estreitas, alvo de intensa deformação tangencial” (WL-WLI, 1993b). Os deslizamentos dividem-se em rotacionais e translacionais de acordo com o tipo de rutura tangencial e das características do material afetado.

Deslizamento rotacional

Os deslizamentos rotacionais (*slumps*, Figura 3) desenvolvem-se ao longo de planos de rutura côncavos e em meios geralmente isotrópicos e homogêneos (Varnes, 1978). Frequentemente, formam-se aclives relativamente pronunciados na superfície topográfica do corpo do deslizamento devido a um abatimento na parte a montante e levantamento na parte jusante, como consequência da rotação do material instabilizado (Hutchinson, 1988).

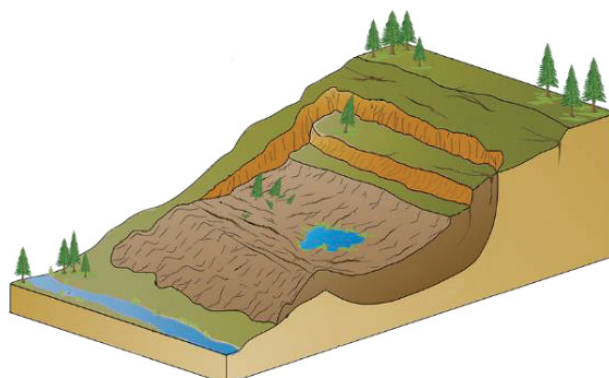


Figura 3 | Esquema de um deslizamento rotacional (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Wyoming State Geological Survey, [n.d.]

Deslizamento translacional

Os deslizamentos translacionais subdividem-se de acordo com o plano de rutura: deslizamentos translacionais com rutura planar e deslizamentos translacionais com rutura compósita.

Os deslizamentos translacionais com rutura planar (Figura 4) ocorrem ao longo de superfícies de rutura planares ou ligeiramente onduladas que podem corresponder a superfícies de fraqueza, marcadas por uma resistência ao corte reduzida, como falhas, planos de estratificação, diaclases ou contacto entre um depósito friável e um substrato rochoso (Varnes, 1978). Estes deslizamentos subdividem-se, em função do tipo de

material afetado, em *rock slide* (deslizamento de rocha), *debris slide* (deslizamento de detritos) e *mudslide* (deslizamentos lamacentos) (Dikau *et al.*, 1996).

Os deslizamentos translacionais com superfície com rutura compósita correspondem a uma combinação entre os deslizamentos rotacionais e os translacionais com rutura planar (Zêzere, 2000). O plano de rutura apresenta uma forma circular ou planar, com forte inclinação a montante e uma forma planar com inclinação reduzida a jusante. Relativamente ao tipo de material afetado, estes deslizamentos são denominados por *block slide*, quando o tipo de material é rocha, ou detritos em bloco e *slab slide*, quando o tipo de material é solo em bloco (Dikau *et al.*, 1996).

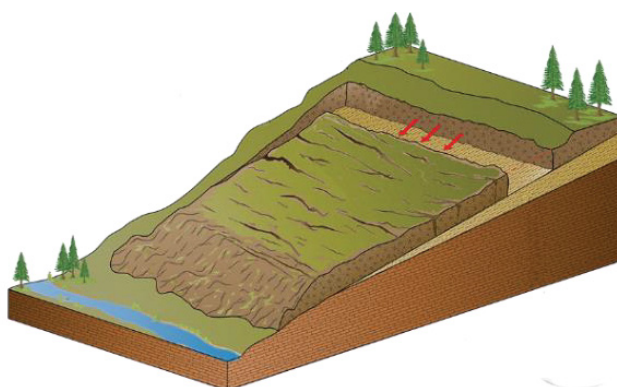


Figura 4 | Esquema de um deslizamento translacional de rutura planar (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Wyoming State Geological Survey, [n.d.]

Escoada

Uma escoada (*flow*, Figura 5) é definida como um “movimento espacialmente contínuo onde as superfícies de tensão tangencial são efémeras e frequentemente não preservadas. A distribuição das velocidades na massa instabilizada assemelha-se a um fluxo viscoso” (WP/WLI, 1993).

As escoadas de detritos apresentam uma mistura de materiais heterogêneos finos, como argila e areias, e grosseiros, como calhaus e blocos desagregados, acompanhados de água, formando uma massa em direção à base da vertente, por ação da força da gravidade (Corominas *et al.*, 1996). As escoadas em rochas são movimentos extremamente lentos e correspondem a deformações gravíticas profundas, do tipo *creep*, que afetam massas rochosas muito diaclasadas ou estratificadas, em vertentes montanhosas (Bisci *et al.*, 1996).

As escoadas têm geralmente início como deslizamento que se transformam em escoada por fluidificação do material afetado através do aumento do volume ou liquefação da massa instável, sendo esta evolução propiciada igualmente pela morfologia do terreno (Zêzere, 2005).

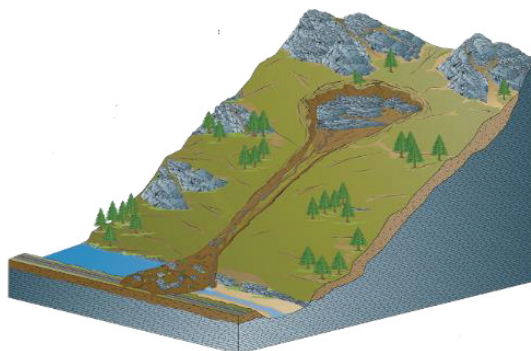


Figura 5 | Esquema de uma escoada (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Wyoming State Geological Survey, [n.d.]

Expansão lateral

A expansão lateral (Figura 6) corresponde a uma “extensão de massas coesivas de solo ou rocha, combinada com uma subsidência geral da massa coesiva fraturada no material subjacente mais brando. Na superfície de rutura não se verifica um cisalhamento intenso. Pode resultar da liquefação ou escoada do material brando subjacente” (WP-WLI, 1993b). A expansão lateral em rocha é um processo com uma movimentação muito lenta, enquanto a expansão lateral em solos é um mecanismo extremamente rápido.



Figura 6 | Esquema de expansão lateral (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Highland e Bobrosky, 2008)

2.1.3. Fatores condicionantes e fatores desencadeantes

Popescu (1994) efetuou uma sistematização das causas dos movimentos de vertente, dividindo-os em fatores preparatórios e fatores desencadeantes (Figura 7). Posteriormente, Glade e Crozier (2005), considerando três estádios de estabilidade das vertentes, propuseram uma nova divisão em fatores preparatórios, de predisposição e desencadeantes.

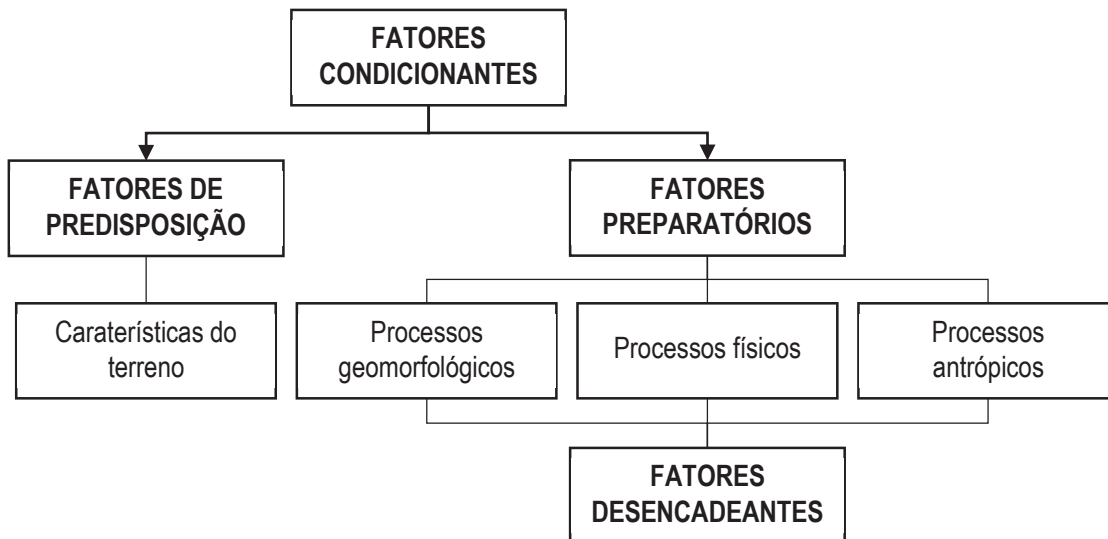


Figura 7 | Fatores responsáveis pela ocorrência de movimentos de vertente (adaptado de Popescu, 1994).

Os fatores condicionantes relacionam as caraterísticas do terreno e um conjunto de processos que atuam, a longo ou a curto prazo, na estabilidade das vertentes, estabelecendo as condições responsáveis pela ocorrência de instabilidade.

Os fatores de predisposição compreendem todos os fatores que são estáticos e inerentes ao terreno e que condicionam o grau de instabilidade potencial das vertentes, atuando como catalisadores para que outros fatores instabilizadores atuem mais eficazmente. Os fatores preparatórios são dinâmicos e promovem a diminuição da estabilidade da vertente, no entanto, sem desencadear o movimento. São processos que podem ocorrer ao longo de períodos de tempo muito variáveis. Os fatores desencadeantes propiciam o desencadeamento efetivo de um movimento de vertente, com origem em determinados processos geomorfológicos, físicos e antrópicos.

2.1.4. Modelo concetual do risco

A terminologia do modelo concetual do risco empregue nesta dissertação baseia-se na terminologia internacional sistematizada por Varnes e pela *Internacional Association of Engineering Geology Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes* da UNESCO (1984).

O risco (*risk*) é definido como “o número de mortos, feridos expectáveis e prejuízos materiais diretos e indiretos devidos a um fenómeno natural particular” e corresponde ao produto da perigosidade pela vulnerabilidade e pelo valor de um elemento ou conjunto de elementos em risco (equação 2.1).

$$Risco = (P_{espacial} \cdot P_{temporal} \cdot P_{magnitudo}) \cdot Vulnerabilidade \cdot Valor \quad (2.1)$$

O conceito de perigosidade (*hazard*) consiste na “probabilidade de ocorrência de um fenómeno potencialmente destruidor, num determinado período de tempo, numa dada área e com uma dada magnitude”. A perigosidade é, portanto, função de 3 principais integrantes: a probabilidade espacial, a probabilidade temporal de ocorrência de movimento de vertente e a probabilidade de um movimento de vertente ocorrer com uma determinada magnitude.

A suscetibilidade (*susceptibility*) é definida como a “probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenómeno numa dada área, com base na relação existente entre os fatores de predisposição e a distribuição espacial dos movimentos de vertente, independentemente do seu período de retorno”.

Os elementos em risco correspondem a todos os elementos passíveis de serem afetados (e.g. pessoas, animais, equipamentos, infraestruturas, ou atividades económicas) e o conceito de vulnerabilidade (*vulnerability*) corresponde ao “grau de perda expectável” de um ou mais elementos em risco resultante da ocorrência de um fenómeno natural de determinada magnitude, sendo expressa numa escala entre 0 (sem perda) e 1 (perda total).

2.2. ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE

2.2.1. Tipos de metodologias de análise da suscetibilidade

Os métodos de análise da suscetibilidade são divididos em dois grupos distintos: métodos de avaliação direta ou qualitativa, através dos quais a identificação da suscetibilidade é feita em termos descritivos, como é o caso do método de cartografia direta; e métodos de avaliação indireta ou quantitativa que produzem estimativas numéricas sobre a ocorrência de movimentos de vertente numa determinada área, e que são definidas por métodos heurísticos, pela análise de inventários e pela aplicação de métodos de análise estatística/probabilística ou por modelos com base determinística.

O método de cartografia direta assenta no conhecimento e experiência do investigador e baseia-se no princípio da observação e da comparação entre os fenómenos de instabilidade e os fatores de predisposição identificados. Todas as fases de desenvolvimento deste método são altamente subjetivas, dificultando a comparação de mapas de suscetibilidade produzidos por diferentes investigadores, uma vez que não estão clarificadas as regras que estão na base da avaliação da suscetibilidade (Leroi, 1996). Assim sendo, os resultados dificilmente são reprodutíveis e apenas validáveis após a ocorrência de novos fenómenos de instabilidade (Zêzere, 2010).

Os métodos heurísticos são sustentados pelo nível de conhecimento, compreensão e análise por parte do investigador das causas e fatores potenciadores da instabilidade e o controlo que exercem no desenvolvimento de movimentos de vertente numa determinada área de estudo (Guzzetti, 2005). A hierarquização e ponderação dos fatores é realizada, de forma subjetiva pelo investigador, com base na importância para a ocorrência de movimentos de vertente (Guzzetti, 2005).

A análise de inventários de movimentos de vertente permite a elaboração de mapas de densidade de movimentos de vertente que demonstram a percentagem de área instabilizada ou o número de ocorrências numa área de estudo. Assim sendo, este método tenta prever futuros fenómenos de instabilidade com base apenas na distribuição espacial de movimentos de vertente passados inventariados, sem ter em consideração os fatores de predisposição (Guzzetti, 2005).

Os métodos estatísticos possibilitam avaliar quantitativa e objetivamente a suscetibilidade, permitindo validar o modelo preditivo e avaliar a importância do contributo de cada fator condicionante para o mapa final de suscetibilidade, decidindo-se sobre a sua inclusão ou exclusão atendendo ao comportamento do modelo (Guzzetti, 2005). Os métodos estatísticos podem utilizar análises bivariadas (e.g. valor informativo, lógica

difusa, *weights of evidence*) ou multivariadas (e.g. análise discriminante e regressão logística), de acordo com a forma como se quantificam as relações entre as variáveis dependentes e as variáveis independentes.

Na análise estatística bivariada, cada fator de predisposição (variáveis independentes) é comparado com o inventário de movimentos de vertente (variável dependente). O valor de ponderação de cada classe pertencente a cada fator de predisposição é determinado de forma independente com base numa análise meramente frequencista (Aleotti e Chowdhury, 1999).

Na análise estatística multivariada, a relação entre cada variável independente e a ocorrência de movimentos de vertente é ponderada de forma combinada entre todas as variáveis independentes. Os métodos multivariados fornecem, assim, uma abordagem mais realista e objetiva da avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (Baeza e Corominas, 2001).

Os métodos determinísticos baseiam-se em leis físicas e mecânicas que controlam a estabilidade das vertentes (Dietrich *et al.*, 1995). Estes métodos são aplicados à análise da estabilidade de vertentes específicas ou em pequenas áreas geográficas com características geológicas e geomorfológicas muito homogêneas. Para a utilização deste tipo de modelos é necessária a existência de informação muito detalhada sobre a geometria das vertentes e sobre as propriedades físicas, mecânicas e hidrológicas dos materiais que os constituem, determinadas no campo ou laboratorialmente (Soeters e van Westen, 1996).

2.2.2. Dados de entrada para a modelação da suscetibilidade com base estatística/probabilística

a) Movimentos de Vertente

Os inventários de movimentos de vertente são reconhecidos como parâmetros de entrada extremamente importantes uma vez que os fenómenos de instabilidade irão ocorrer, provavelmente, sob as mesmas condições que ocorreram no passado e acontecem no presente, tal como pressupõe o Princípio do Uniformitarismo (Guzzetti *et al.*, 1999).

A avaliação da suscetibilidade com base em métodos estatísticos assenta na utilização de um inventário de movimentos de vertente, sendo a sua construção, no geral, um procedimento complexo que procura a localização rigorosa e a identificação de características específicas, podendo ser representados cartograficamente através de pontos ou polígonos.

O processo de inventariação pode ser realizado através de uma diversidade de técnicas, podendo variar de acordo com a extensão da área a cartografar, a escala utilizada, as particularidades envolvidas, os dados e recursos disponíveis e a experiência do operador (Guzzetti *et al.*, 2000).

De entre as técnicas mais utilizadas para a inventariação, podem destacar-se os levantamentos com base em arquivos históricos, a inventariação de campo, a fotointerpretação, a análise de fotografias de satélite e a análise de representações digitais da superfície topográfica (Guzzetti *et al.*, 2000).

Independente da(s) técnica(s) adotada(s), a cartografia dos movimentos de vertente é baseada nas principais características que os diferentes tipos de movimentos de vertente deixam na morfologia, vegetação e rede de drenagem (Soeters e van Westen, 1996).

b) Fatores de predisposição

As condições que promovem a instabilidade de vertentes incluem, entre outras variáveis, os fatores de predisposição.

A seleção dos fatores de predisposição e a sua importância para a avaliação da suscetibilidade varia de local para local, com o tipo de movimento de vertente (Glade e Crozier, 2005), da disponibilidade de dados e informações existentes, dos custos envolvidos na análise e da escala que irá ser utilizada (van Westen *et al.*, 2008).

Para além da seleção dos fatores de predisposição, a sua transformação de variáveis contínuas em variáveis categóricas é também importante, face à elevada quantidade de informação, à inexistência de condições computacionais ou à compatibilização com variáveis originalmente categóricas, não havendo regras precisas para a sua classificação. Segundo Marques (2013), uma simplificação excessiva dos fatores de predisposição contínuos pode retirar-lhes capacidade de discriminação da instabilidade do território e um número excessivo de classes não garante melhores resultados finais de predição. As variáveis originalmente categóricas podem, também elas, apresentar um número excessivo de classes, ou as classes definidas originalmente não serem eficientes na discriminação da instabilidade.

A determinação da Favorabilidade (F_i) (Chung e Fabbri, 2003) para cada uma das classes de cada fator de predisposição permite aferir de uma forma direta a maior ou menor predisposição que uma classe tem de nela ocorrer um movimento de vertente (Equação 2.2), uma vez que o valor da favorabilidade se aproxima de uma probabilidade condicionada (Zêzere *et al.*, 2004).

$$F_i = 1 - \left(1 - \frac{I}{N_{UT_i}} \right)^{UT_i \cap UT_{mv}} \quad (2.2)$$

Sendo:

$UT_i \cap UT_{MV}$, o número de UT's com movimentos de vertente (UT_{MV}) contidas nas UT's da classe i (UT_i) de um qualquer fator de predisposição;

N_{UT_i} , o número total de UT's da classe i .

2.2.3. Método de análise da suscetibilidade

A análise da suscetibilidade a movimentos de vertente pode ser realizada através de diversos métodos e técnicas. O presente trabalho define os algoritmos de suscetibilidade através do método do Valor Informativo (Yin e Yan, 1988). Este método estatístico bivariado resulta do logaritmo da razão entre a probabilidade condicionada e a probabilidade *a priori*, relacionando cada classe de cada variável independente (fatores de predisposição) e uma variável dependente (movimentos de vertente). Para cada uma das classes de cada variável independente é determinado o respetivo valor informativo, bem como o valor informativo final de cada unidade de terreno.

O cálculo do valor informativo de cada variável independente (I_i) é efetuado com base na equação 2.3 (e.g. Marques, 2013):

$$I_i = \ln \left(\frac{S_i / N_i}{S / N} \right) \quad (2.3)$$

Sendo:

I_i , o valor informativo da variável i ;

S_i , o número de UT's com movimentos de vertente na área de estudo, na presença da variável i ;

N_i , o número de UT's na presença da variável i ;

S , o número total de UT's com movimentos de vertente na área de estudo;

N , o número total de UT's na área de estudo.

A determinação do valor informativo final de cada unidade de terreno (I_j) resulta da soma dos valores de I_i de cada uma das variáveis independentes, e é determinada pela seguinte equação 2.4 (e.g. Marques, 2013):

$$I_j = \sum_{i=1}^n X_{ji} \cdot I_i \quad (2.4)$$

Sendo:

I_j , o valor informativo da UT j ;

I_i , o valor informativo de cada UT de cada variável independente;

n , o número de variáveis;

X_{ji} , o valor de 1 ou 0 consoante a presença ou não da variável na UT.

Considera-se, quando o valor de I_i é negativo, que a presença da classe i inibe a ocorrência de movimentos de vertente, sendo que, valores positivos de I_i indicam uma relação entre a presença da variável e a ocorrência de movimentos de vertente, tanto mais acentuada quanto mais se afastar do valor 0. Valores de I_i muito próximos de zero indicam que a relação da variável independente com a ocorrência de movimentos de vertente é inexistente ou inconclusiva. Quando o valor resultante de S_i é igual a zero, atribui-se o valor mais baixo de I_i encontrado nas restantes classes da variável em questão.

O valor informativo final de cada unidade de terreno (I_j) traduz a sua suscetibilidade a movimentos de vertente, sendo maior a suscetibilidade quanto mais positivo for o valor de I_j e menor, quando mais negativo for o valor de I_j .

O método do Valor Informativo é o que mais se destaca em trabalhos de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente a nível nacional (e.g. Zêzere, 1997; Garcia, 2012; Pereira, 2009). Alguns estudos mostram que os resultados da avaliação da suscetibilidade com base no método do Valor Informativo apresentam-se bastante satisfatórios comparativamente a outros métodos estatísticos mais complexos (e.g. Marques *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2009; Marques, 2013).

2.2.4. Metodologia de validação

A componente mais importante, e absolutamente essencial, para avaliar a capacidade preditiva dos mapas de suscetibilidade é a validação dos resultados obtidos, uma vez que sem esta etapa o modelo e os mapas são totalmente inúteis e dificilmente terão qualquer significado científico (Chung e Fabbri, 2003).

A validação dos mapas de suscetibilidade deve ser realizada com base num grupo de movimentos de vertente independente do que foi utilizado na construção do modelo de suscetibilidade, uma vez que a utilização do mesmo grupo para a criação do modelo e para a validação enviesaria os resultados positivamente (Fabbri *et al.*, 2002; Chung e Fabbri, 2003).

Segundo Chung e Fabbri (2003), a validação dos modelos de suscetibilidade pressupõe a divisão dos inventários de movimentos de vertente de acordo com métodos de partição temporal, espacial ou aleatória. O primeiro método considera que o inventário deve ser dividido, tendo por base uma data, em dois períodos de tempo distintos, pré-data (eventos passados), que será utilizado para construir o modelo, e pós-data (eventos futuros), que será utilizado na sua validação. O segundo tipo de partição faz alusão a uma divisão espacial do terreno em duas subáreas, uma de modelação e outra de predição, garantindo homogeneidade relativamente aos fatores de predisposição. No terceiro método, o inventário é fragmentado espacialmente, obtendo-se uma distribuição irregular que tende a cobrir toda a área de estudo, de forma semelhante à divisão temporal.

A validação dos modelos/mapas de suscetibilidade pode ser efetuada com base no cálculo das curvas de sucesso (*Success Rate Curves*, SRC's) e das curvas de predição (*Prediction Rate Curves*, PRC's). Estas curvas, propostas por Chung e Fabbri (1999), resultam da integração de percentagens acumuladas entre os níveis de suscetibilidade, dispostos em ordem decrescente, e a área instabilizada dada pelo inventário de movimentos de vertente.

As curvas de sucesso são calculadas através do cruzamento do mapa de suscetibilidade com o inventário de movimentos de vertente que lhe deu origem. Pelo contrário, as curvas de predição são calculadas através do cruzamento entre o mesmo mapa e um inventário independente do utilizado na criação do algoritmo de suscetibilidade.

Atendendo aos respetivos graus de independência, espera-se que as taxas de sucesso sejam melhores do que as taxas de predição para uma determinada área de estudo (Chung e Fabbri, 2003). A avaliação e a comparação da qualidade dos algoritmos são feitas através do cálculo das "áreas abaixo da curva" (AAC). A AAC calcula-se a partir da fórmula 2.5 (*e.g.* Marques, 2013):

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[(a_{i+1} - a_i) \cdot \frac{o_{i+1} + o_i}{2} \right] \quad (2.5)$$

Sendo:

$a_{i+1} - a_i$, a amplitude de um intervalo com valor de abcissa superior a_{i+1} e inferior a_i ;

$o_{i+1} + o_i$, a amplitude do intervalo definido pelas ordenadas o_{i+1} e o_i , correspondente às abcissas a_{i+1} e a_i , respetivamente.

Apresenta como extremos os valores 0 e 1 sendo que, quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste do modelo aos dados de entrada. O valor de 0,5, expresso por uma linha diagonal que une os pontos (0,0) e (1,1) diz respeito ao aleatório, abaixo da qual nenhum modelo deve ser considerado.

Os resultados das AAC's obtidos devem ser confrontados com limites de aceitação. Embora existam várias classificações para os valores das AAC's, foram considerados no presente trabalho os valores propostos por Guzzetti (2005), uma vez que são padrões exigentes e foram desenvolvidos para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (Tabela 1).

Tabela 1 | Classificação de curvas de modelos com base no cálculo das áreas abaixo da curva (AAC's), de acordo com Guzzetti (2005).

Classificação	Área Abaixo da Curva (AAC)
Excelente ou extremamente satisfatório	> 0,9
Boa	0,8 - 0,9
Aceitável ou razoável	0,75 - 0,8

2.2.5. Classificação do mapa de suscetibilidade

No final do processo de modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente, independentemente do método e das variáveis utilizadas, serão produzidas grandes quantidades de índices associados a cada unidade de terreno que compõe o mapa de suscetibilidade. Esse resultado é, na grande maioria das vezes, muito difícil de ser interpretado, sendo necessária a implementação de um processo de reclassificação dos mapas em classes, em que cada classe representará um nível de suscetibilidade para um conjunto de unidades de terreno com um determinado intervalo de valores.

A classificação dos mapas de suscetibilidade pode ser feita a partir de métodos com recurso a estatística descritiva, métodos baseados na interpretação das curvas de sucesso ou de predição, métodos baseados em quebras no padrão de distribuição, utilizados para diferenciar classes com valores superiores e/ou inferiores a um valor de referência e métodos baseados na divisão equitativa do território relativamente à sua área (em percentis).

Estudos comparativos realizados por Garcia (2002) e Garcia *et al.* (2007) demonstram que a divisão dos mapas em classes é subjetiva, sendo que os resultados da aplicação de diferentes métodos de divisão em classes, são estatisticamente corretos. Segundo Garcia *et al.* (2007), o melhor mapa de suscetibilidade deverá apresentar uma melhor relação entre o maior número de movimentos preditos e a menor percentagem de área classificada como mais suscetível, contribuindo de facto para o aumento da respetiva capacidade preditiva.

Para avaliar a eficiência preditiva das classes de suscetibilidade é calculada a Razão de Eficiência (*Ratio of Effectiveness, rE_i*) proposta por Chung & Fabbri (2003), que relaciona a probabilidade de uma UT, localizada dentro da classe i , ser afetada por um movimento de vertente $P(UTi_{MV})$ e a probabilidade de uma UT ser afetada por um movimento de vertente na área de estudo $P(UT_{MV})$ (Equação 2.6).

$$rE_i = \frac{P(UTi_{MV})}{P(UT_{MV})} = \frac{\frac{UT_{MV} \cap UT_i}{UT_i}}{\frac{UT_{MV}}{UT_{total}}} = \frac{(UT_{MV} \cap UT_i) \cdot (UT_{total})}{(UT_i) \cdot (UT_{MV})} \quad (2.6)$$

Sendo:

UT_{MV} , o número de UT's matriciais com movimentos de vertente;

UT_{total} , o número total de UT's na área de estudo;

$UT_{MV} \cap UT_i$, correspondente ao número de UT's matriciais com movimentos de vertente existente na classe de suscetibilidade i ;

UT_i , o número total de UT's matriciais ocupadas pela classe i .

Assim, quando as razões de eficiência são iguais ou próximas de 1, as classes de suscetibilidade não apresentam capacidade preditiva ou discriminatória, sendo constituídas por uma seleção aleatória de unidades de terreno (Chung e Fabbri, 2003). Valores inferiores a 1 e próximos a zero caracterizam áreas com

baixa suscetibilidade e valores muito superiores a 1 caracterizam áreas de elevada suscetibilidade (Guzzetti *et al.*, 2006). No presente trabalho foi adotada a classificação proposta por Chung e Fabbri (2003) (Tabela 2).

Tabela 2 | Escala qualitativa da capacidade preditiva das classes de suscetibilidade, com base na Razão de Eficiência (rE_i).

Eficiência de classificação		Razão de Eficiência (rE_i)
Suscetibilidade elevada	Muito significativa	>6
	Significativa]3; 6]
Não significativa]0,2; 3]
Suscetibilidade baixa	Significativa	[0,1;0,2]
	Muito significativa	<0,1

2.3. ALGORITMIA E AUTOMATIZAÇÃO DE PROCESSOS

A palavra automatização, do latim *automatus*, significa “mover-se por si”, ou seja, dotar um equipamento de meios que lhe permitam realizar a sua função automaticamente, sem a intervenção humana.

A automatização teve o seu início nos primórdios da Humanidade, com a criação de ferramentas e utensílios que auxiliavam o trabalho, permitindo diminuir o esforço e economizar tempo. A Revolução Industrial, impulsionada no século XVIII, propiciou o desenvolvimento da automatização quando os sistemas de produção agrária e artesanal se transformaram em sistemas industriais. A utilização de diferentes ferramentas informáticas para a obtenção de resultados cuja integração obriga a procedimentos de compatibilização de dados, por vezes morosos, entre diferentes aplicações, a arquitetura, o desenvolvimento e o estabelecimento de processos e de fluxos de trabalho, bem como o desenvolvimento de tecnologia, correspondem às bases que norteiam a automatização contemporânea e a noção moderna de gestão organizacional.

O computador tem mostrado ser uma das máquinas mais versáteis, rápidas e seguras, especialmente desenvolvida para executar algoritmos, tendo em conta os dados de entrada que serão posteriormente processados.

Para que a automatização ocorra é necessária uma sequência de algoritmos, escritos em linguagem de programação, que farão com que o computador realize determinada tarefa. Um algoritmo representa uma sequência finita e não ambígua de instruções elementares bem definidas, conducente à solução de um determinado problema, cada uma das quais executada mecanicamente ou automaticamente numa quantidade finita de tempo (Vasconcelos e Reis, 2002).

A execução de um algoritmo, também designada por processamento de dados, compreende três fases de execução (Vasconcelos e Carvalho, 2005): (1) a entrada de dados, composta por um conjunto de dados requeridos e necessários à execução das instruções do algoritmo; (2) o processamento dos dados, composto por uma sequência finita de instruções que definem simbolicamente o algoritmo; e (3) uma saída de dados, interpretada como o resultado obtido com a execução do algoritmo para a entrada fornecida.

A utilização de linguagens de programação, como uma ferramenta de trabalho, tornou-se cada vez mais importante no quotidiano, uma vez que permitem a execução mais rápida e correta de tarefas repetitivas, que de outra forma seriam morosas e com potencial introdução de erros humanos (Vasconcelos e Carvalho, 2005). Além disso, através de um código interpretado por um computador, é possível criar situações de

ensaio mais elaboradas e complexas do que as realizadas manualmente, possibilitando qualquer combinação de comandos e operações.

O desenvolvimento de um *software* a partir de uma linguagem de programação com o objetivo de automatizar processos, deve contemplar quatro atividades fundamentais, comuns a todos os procedimentos de desenvolvimento de *softwares* (Sommerville, 2010): (1) a especificação, tarefa de descrever detalhadamente o *software*, preferencialmente de uma forma programática e matematicamente rigorosas; (2) o desenvolvimento, transformação da sua especificação para o código fonte executável; (3) a validação, o teste de cada funcionalidade de cada módulo, eliminando qualquer vestígio de erro de implementação ou de especificação; e (4) a evolução, melhoria do *software* com a criação e descoberta de novos itens, necessidades ou erros.

O processo de automatização em diversos setores da atividade humana trouxe uma série de benefícios à sociedade, reduzindo custos e aumentando a produtividade do trabalho. A automatização permite libertar os utilizadores de atividades monótonas, repetitivas ou mesmo perigosas, direcionando a sua atenção para outras tarefas críticas e impossíveis de automatizar.

A necessidade de automatizar deve-se essencialmente à necessidade de repetir procedimentos a qualquer momento. Assim, com a elaboração de automatismos torna-se possível, e com extrema facilidade, analisar e avaliar comportamentos produzidos por modelos em resposta à introdução de dados de entrada com características diferentes. A reprodutibilidade permite simular idênticamente e inúmeras vezes situações específicas, garantindo que passos importantes não serão ignorados por falha humana.

3. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO COMPUTACIONAL *ALSA-Tools*

3.1. SOFTWARE MATLAB

O software MATLAB (*MATrix LABoratory*) produzido pela empresa *The MathWorks Inc.*, utiliza a linguagem de computação MATLAB de alto nível e um ambiente de computação numérica que permite manipulação de matrizes, projeção de funções, processamento digital de imagens e sinais, cálculo numérico, análise de dados e visualização de gráficos, além do desenvolvimento e implementação de algoritmos numéricos ou simbólicos para aplicação nas mais diversas áreas das ciências exatas (Chapman, 2008). Através da escrita de *scripts* e de funções com extensão *.m* (*M-Files*), o MATLAB permite ainda a criação de ferramentas que podem ser aplicadas de forma repetitiva.

O MATLAB fornece ferramentas para a construção de interfaces gráficas de usuário (GUI – *Graphical User Interface*) que são de fácil acesso além de confiáveis. Uma GUI é uma interface ilustrada para um programa desenvolvido no MATLAB que os podem tornar mais fáceis de usar provendo uma aparência consistente e com controles intuitivos como botões, caixas de listas, *sliders* ou menus. A GUI deve comportar-se de forma compreensível e previsível, para que um utilizador saiba o que esperar quando uma ação é realizada (Hahn e Valentine, 2013).

A facilidade de utilização e a grande diversidade de funções predefinidas na área do processamento, foram os principais critérios de seleção do MATLAB para a criação do protótipo computacional para a análise e produção de cartografia de suscetibilidade a movimentos de vertente.

3.2. PROTÓTIPO DESENVOLVIDO EM MATLAB

3.2.1. Arquitetura da aplicação

O protótipo computacional *ALSA-Tools* (*Automatic Landslide Susceptibility Analysis - Tools*), desenvolvido em MATLAB (R2016a), possibilita automatizar os processos e tarefas que permitem analisar e produzir cartografia de suscetibilidade a movimentos de vertente com base no método estatístico do Valor Informativo.

A figura 8 apresenta o fluxograma que, de forma esquemática, representa as instruções e respectivas operações incluídas na aplicação desenvolvida. O fluxograma é formado por caixas que contêm as instruções a serem executadas, ligadas por setas que indicam o fluxo das ações. A representação dos algoritmos através de fluxogramas tem o objetivo de facilitar a compreensão do seu funcionamento e desenvolvimento.

A estrutura da aplicação segue o fluxo lógico da aplicação do método do Valor Informativo, iniciando com a introdução dos dados de entrada, constituídos por um conjunto de fatores de predisposição previamente classificados e um inventário de movimentos de vertente. A inserção dos dados de entrada permite o cálculo da Favorabilidade de cada classe de cada fator de predisposição e a prévia hierarquização desses fatores relativamente à sua capacidade de discriminação da instabilidade. A partir desta fase é possível proceder à aplicação do método do Valor Informativo para cada variável independente (*i.e.* ponderação da sua influência para a ocorrência espacial de movimentos de vertente) e posteriormente o cálculo do Valor Informativo final através do somatório dos valores informativos de cada variável independente para cada uma das unidades de terreno, tendo em consideração todas as combinações possíveis de fatores de predisposição.

O processo seguinte da aplicação incide sobre a validação dos modelos de suscetibilidade gerados no processo anterior, efetuada com base na determinação das curvas de sucesso e das curvas de predição, permitindo avaliar os modelos relativamente ao seu ajuste aos dados de entrada e à sua capacidade preditiva, esta última com base em critérios de partição aleatória do inventário de movimentos de vertente. Subsequentemente a aplicação seleciona o mapa final de suscetibilidade, que corresponde ao modelo que apresenta maior valor de AAC da curva de sucesso.

A classificação do mapa final de suscetibilidade corresponde à componente final da aplicação e é efetuada com base na curva de sucesso e/ou em intervalos definidos com base no valor informativo, sendo os métodos de classificados com base na eficiência preditiva das classes de suscetibilidade definidas, avaliada pelo cálculo da razão de eficiência.

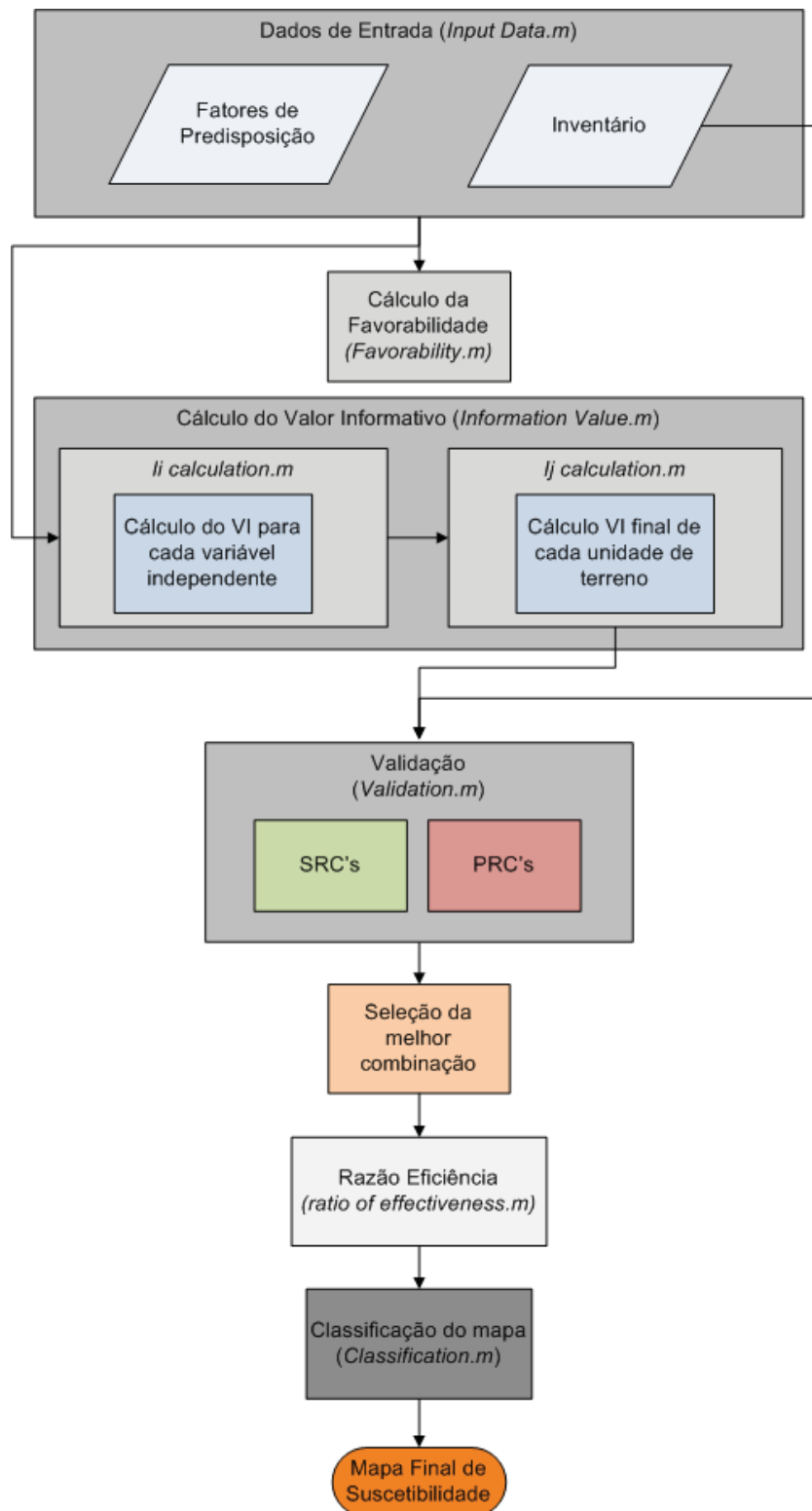


Figura 8 | Fluxograma com a sequência de etapas e *M-files* fundamentais da aplicação.

3.2.2. Descrição dos componentes da aplicação

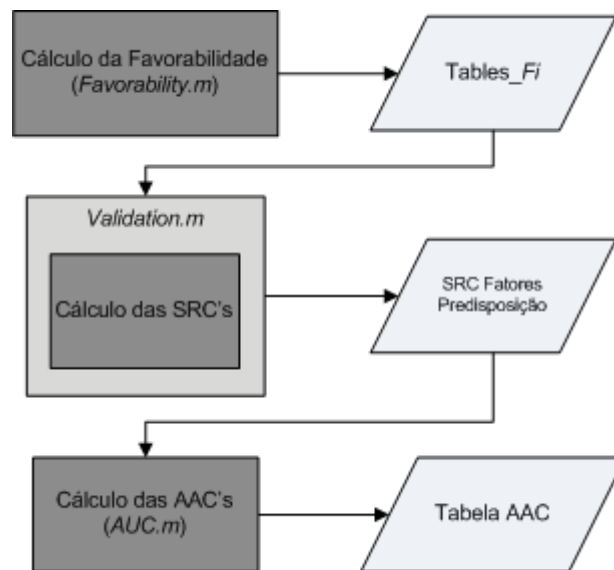
O desenvolvimento do programa informático em ambiente MATLAB para produção de cartografia de suscetibilidade assenta em 5 *M-Files* principais: 1) *Input Data*; 2) *Favorability*; 3) *Information Value*; 4) *Validation* e 5) *Classification*. É possível estabelecer um paralelismo claro entre estas rotinas e a estrutura do modelo lógico apresentado anteriormente. Seguidamente descrevem-se pormenorizadamente as rotinas implementadas e o seu funcionamento.

1) *Input Data.m*

O processo de importação e exportação de dados em ambiente MATLAB apenas é permitido num de dois formatos: texto ou binário. No entanto, de forma a garantir a uniformização dos dados utilizados e o acesso do utilizador aos produtos da aplicação, todos os dados são importados e exportados em formato de texto (ASCII). Os dados ASCII podem ser visualizados em qualquer editor de texto, ao contrário do formato binário.

O *M-File Input Data.m* permite fazer o *upload* dos dados de entrada no programa. Estes devem ser introduzidos em formato texto, compostos pela respetiva informação do sistema de referência de coordenadas, pelos números de linhas e colunas, pelo tamanho do *pixel* utilizado e pelo valor correspondente ao *nodata* (Figura 9 e 10). Relativamente ao valor *nodata*, este estará presente em todos os pixels dos fatores de predisposição que se encontram fora da área de estudo, tendo os restantes pixels o valor correspondente à classificação prévia do fator. No caso do inventário de movimentos de vertente o valor *nodata* está associado a todos os pixels onde não se encontram movimentos de vertente.

Através de um *browser*, esta rotina possibilita carregar os dados a partir de qualquer diretório onde se encontrem armazenados. No caso específico dos fatores de predisposição, a aplicação questiona o utilizador sobre o número de fatores que serão tidos em conta, sendo estes, posteriormente, carregados de forma sequencial.

Figura 11 | Fluxograma do *M-File Favorability.m*.

Selecionando uma diretoria para guardar os produtos de saída, a rotina cria uma pasta com o nome *tables_Fi*, onde são guardadas tabelas resumo para cada fator de predisposição com os valores do cálculo da Favorabilidade (Equação 2.2) para cada classe. O ficheiro apresenta os dados em formato texto sob a forma de colunas. A primeira coluna apresenta as classes definidas para cada fator de predisposição, a segunda e a terceira, as frequências absolutas e relativas referentes a cada classe. A quarta e quinta colunas permitem visualizar, respetivamente, o número de pixéis com movimentos de vertente em cada classe e a sua frequência relativa. A última coluna apresenta o valor da Favorabilidade para cada classe (Figura 12).

Através da rotina *AUC.m* é possível calcular as áreas abaixo das curvas de sucesso definidas individualmente para cada fator de predisposição, permitindo, posteriormente, efetuar a sua hierarquização.

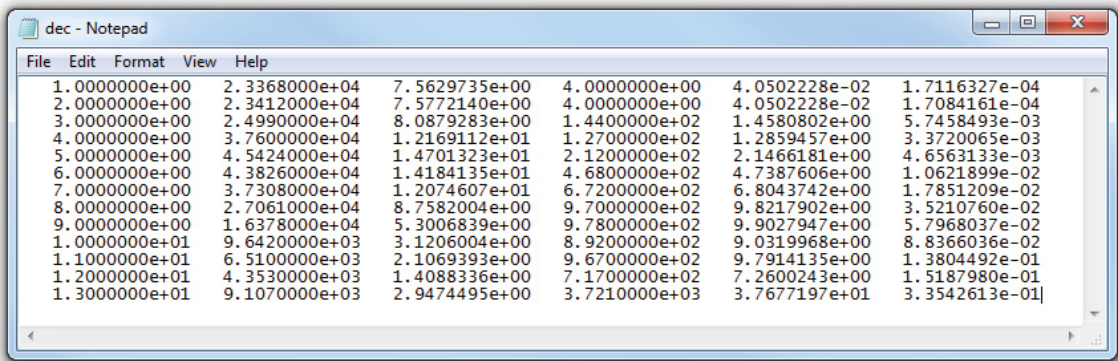


Figura 12 | Aspeto da tabela resumo guardada na pasta *tables_Fi* (exemplo da variável decline).

3) Information Value.m

O *M-File Information Value.m* permite o cálculo do valor informativo através de duas rotinas: o cálculo do valor informativo para cada variável independente (li) e o valor informativo final de cada unidade de terreno (lj) (Figura 13).

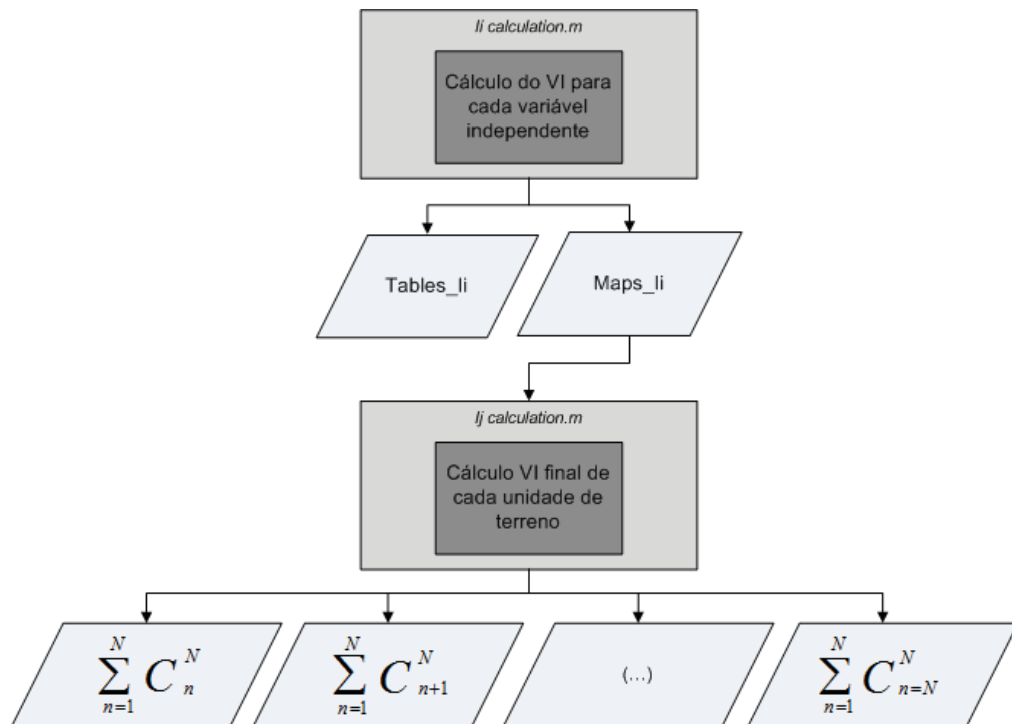
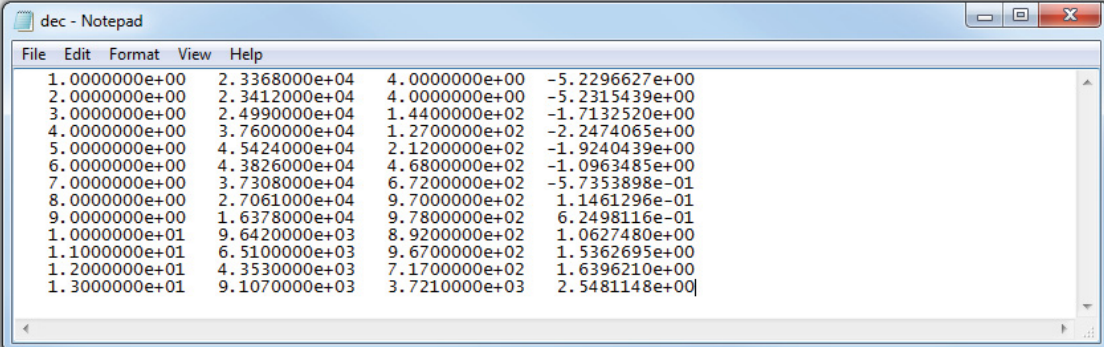


Figura 13 | Fluxograma do *M-File Information Value.m*.

A rotina do *li calculation.m* calcula o valor informativo para cada variável independente através do cruzamento dos fatores de predisposição com o inventário de movimentos de vertente.

Após a seleção de uma diretoria por parte do utilizador para guardar os produtos de saída, a rotina cria duas pastas com os nomes *maps_li* e *tables_li*. Na pasta *tables_li* são guardados ficheiros em formato texto com tabelas resumo para cada fator de predisposição com os valores de cada componente da equação do cálculo do I_i (Figura 14, Equação 2.3). A primeira coluna apresenta as classes definidas para cada fator de predisposição, a segunda coluna as frequências absolutas referentes a cada classe e a terceira coluna permite visualizar o número de pixéis com movimentos de vertente em cada classe. A última coluna apresenta o valor informativo de cada classe. Nos casos em que $S_i=0$ obtém-se uma impossibilidade matemática e, em tais casos, o programa atribui a essas classes o valor mais baixo de I_i calculado para as restantes classes do mesmo fator de predisposição.

Na pasta *maps_li* são guardados em formato texto todos os mapas de cada fator de predisposição com a variação espacial dos valores de *li* determinados para cada classe (Figura 15). É atribuído o valor -9999 aos pixéis que se situam fora da área de estudo.



File	Edit	Format	View	Help
1.000000e+00	2.336800e+04	4.000000e+00	-5.2296627e+00	
2.000000e+00	2.341200e+04	4.000000e+00	-5.2315439e+00	
3.000000e+00	2.499000e+04	1.440000e+02	-1.7132520e+00	
4.000000e+00	3.760000e+04	1.270000e+02	-2.2474065e+00	
5.000000e+00	4.542400e+04	2.120000e+02	-1.9240439e+00	
6.000000e+00	4.382600e+04	4.680000e+02	-1.0963485e+00	
7.000000e+00	3.730800e+04	6.720000e+02	-5.7353898e-01	
8.000000e+00	2.706100e+04	9.700000e+02	1.1461296e-01	
9.000000e+00	1.637800e+04	9.780000e+02	6.2498116e-01	
1.000000e+01	9.642000e+03	8.920000e+02	1.0627480e+00	
1.100000e+01	6.510000e+03	9.670000e+02	1.5362695e+00	
1.200000e+01	4.353000e+03	7.170000e+02	1.6396210e+00	
1.300000e+01	9.107000e+03	3.721000e+03	2.5481148e+00	

Figura 14 | Aspeto da tabela resumo guardada na pasta *tables_li* (exemplo da variável decline).

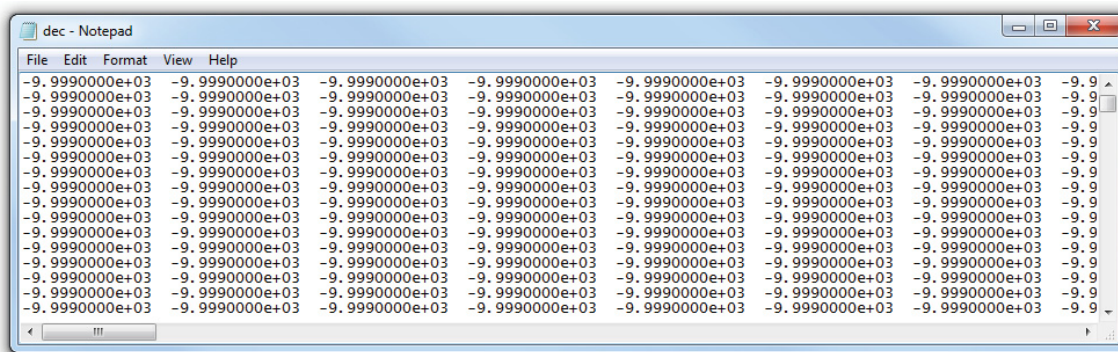


Figura 15 | Aspeto do mapa com os valores de *lj* guardado na pasta *maps_lj* (exemplo da variável *declive*).

A rotina do *lj calculation.m* calcula o valor informativo final de cada unidade de terreno, obtido através do somatório dos valores informativos de cada classe de cada fator de predisposição presente na unidade de terreno.

Esta rotina da aplicação contém os processos com maior peso computacional, possibilitando a produção de modelos de suscetibilidade para todas as combinações possíveis de fatores. O utilizador tem a possibilidade de selecionar uma diretoria, a qual é automaticamente designada por *maps_lj*, onde serão guardados todos os ficheiros correspondentes a cada uma das combinações possíveis de fatores (Figura 16). O nome dos ficheiros é composto pelo número de fatores que constituem o modelo seguido de um acrónimo com 3 caracteres indicador do nome de cada fator presente na combinação (e.g. *05acm_dec_exp_geo_ins.txt*).

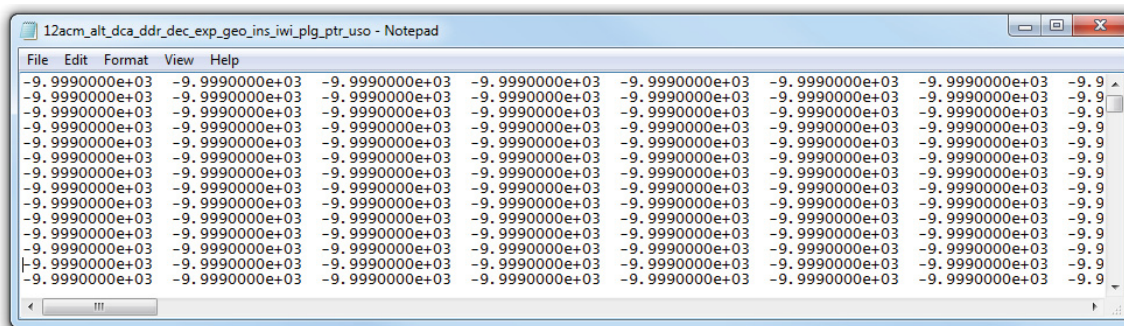


Figura 16 | Aspeto do mapa com os valores de *lj* guardado na pasta *maps_lj* (exemplo de modelo com 12 fatores).

4) *Validation.m*

O *M-File validation.m* permite a validação dos modelos/mapas de suscetibilidade, gerados na última fase do *M-File Information Value.m*, com base no cálculo das curvas de sucesso e das curvas de predição (Figura 17).

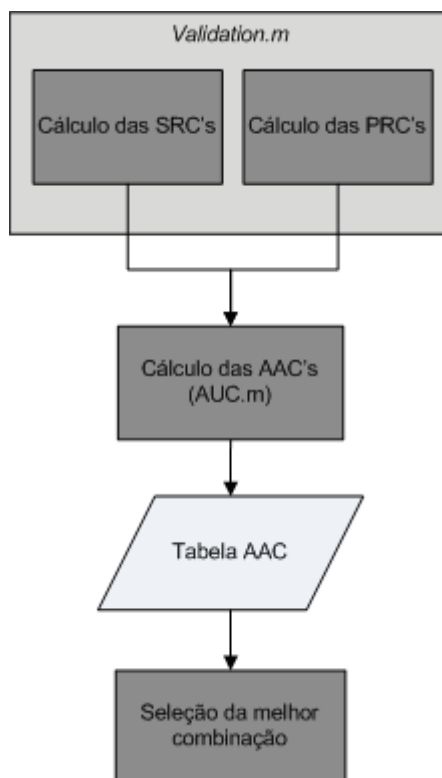
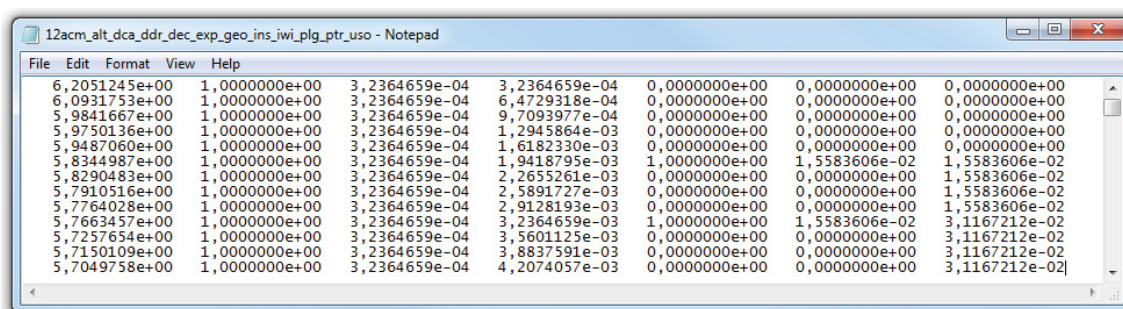


Figura 17 | Fluxograma do *M-File Validation.m*.

Após a seleção de uma diretoria por parte do utilizador, o *M-File* cria uma pasta com o nome *validation*, onde são guardados os ficheiros para cada modelo com a informação resultante do processo de validação. Os ficheiros apresentam os dados em formato texto sob a forma de colunas (Figura 18). A primeira coluna apresenta os valores informativos presentes no modelo, por ordem decrescente, a segunda, terceira e quarta colunas, as frequências absolutas, relativas e relativas acumuladas referentes a cada valor informativo, respetivamente. A quinta coluna mostra o número de pixéis com movimentos de vertente correspondente a

cada valor informativo, e a sexta e sétima colunas, as respectivas frequências relativas e relativas acumuladas.

Através da rotina *AUC.m* é possível a determinação das áreas abaixo das curvas de sucesso e predição, permitindo fazer uma avaliação quantitativa da capacidade preditiva global de cada modelo de suscetibilidade. Esta rotina exporta ainda um ficheiro com os resultados do cálculo das AAC, constituído pela designação de cada modelo, o número de fatores que o constituem e o respetivo valor de AAC. No final desta rotina é selecionado o melhor mapa de suscetibilidade que corresponde ao modelo que apresenta maior valor de AAC da curva de sucesso.

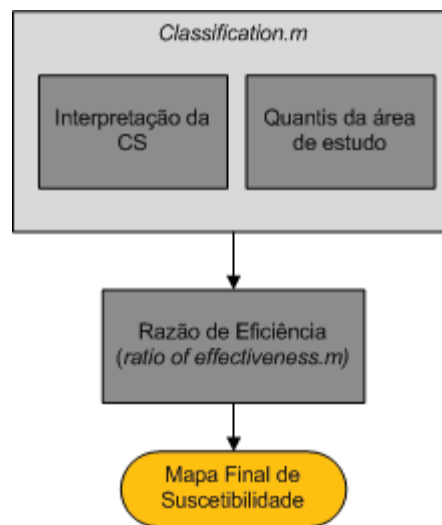


File	Edit	Format	View	Help					
6,2051245e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	3,2364659e-04	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00
6,0931753e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	6,4729318e-04	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00
5,9841667e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	9,7093977e-04	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00
5,9750136e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	1,2945864e-03	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00
5,9487060e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	1,6182330e-03	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00
5,8344987e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	1,9418795e-03	1,0000000e+00	1,5583606e-02	1,5583606e-02	1,5583606e-02	1,5583606e-02	1,5583606e-02
5,8290483e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	2,2655261e-03	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	1,5583606e-02	1,5583606e-02
5,7910516e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	2,5891727e-03	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	1,5583606e-02	1,5583606e-02
5,7764028e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	2,9128193e-03	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	1,5583606e-02	1,5583606e-02
5,7663457e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	3,2364659e-03	1,0000000e+00	1,5583606e-02	1,5583606e-02	3,1167212e-02	3,1167212e-02	3,1167212e-02
5,7257654e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	3,5601125e-03	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	3,1167212e-02	3,1167212e-02
5,7150109e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	3,8837591e-03	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	3,1167212e-02	3,1167212e-02
5,7049758e+00	1,0000000e+00	3,2364659e-04	4,2074057e-03	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	0,0000000e+00	3,1167212e-02	3,1167212e-02

Figura 18 | Aspeto do ficheiro de validação guardado na pasta *validation* (exemplo de modelo com 12 fatores).

5) *Classification.m*

O *M-File classification.m* permite classificar o mapa final de suscetibilidade com base na interpretação da curva de sucesso e no método dos quantis da área de estudo (Figura 19). Para suportar a decisão relativamente à abordagem mais adequada a adotar calcula-se, através da rotina *ratio of effectiveness.m*, a razão de eficiência de cada classe definida com base nos diferentes métodos descritos.

Figura 19 | Fluxograma do *M-File Classification.m*.

Os ficheiros apresentam os dados em formato texto sob a forma de colunas (Figura 20). A primeira coluna apresenta os valores de corte do Valor Informativo correspondente a cada classe, a segunda coluna mostra a percentagem acumulada de área de estudo em cada classe considerada e a terceira coluna a percentagem acumulada de área instabilizada em cada classe. A quarta coluna mostra a Razão de Eficiência calculada para cada classe de suscetibilidade.

A imagem mostra uma janela de texto com o título "07acm_ddr_dec_exp_geo_ins_uso - Notepad". O conteúdo do ficheiro é o seguinte:

7.4879646e-01	1.0725972e+01	9.0006075e+01	8.3914146e+00
-8.3105363e-01	1.7490833e+01	9.4997975e+01	7.4229987e-01
-9.6574991e+00	1.0000000e+02	1.0000000e+02	6.0746353e-02

Figura 20 | Aspeto do ficheiro de cálculo da Razão de Eficiência (exemplo de classificação por interpretação da curva de sucesso).

4. APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO COMPUTACIONAL *ALSA-Tools*: UM CASO DE ESTUDO NA FREGUESIA DO LAJEDO (ILHA DAS FLORES, AÇORES)

4.1. ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1. Enquadramento geográfico e administrativo

O arquipélago dos Açores localiza-se no Oceano Atlântico Norte definido pelas seguintes coordenadas geográficas (pontos extremos): entre 39° 43' 23" (Ponta Norte – ilha do Corvo) e 36° 55' 43" (Ponta do Castelo – ilha de Santa Maria) de Latitude Norte; entre 24° 46' 15" (Ilhéus das Formigas – ilha de Santa Maria) e 31° 16' 24" (Ilhéu de Monchique – ilha das Flores) de Longitude Oeste (Figura 21).

As nove ilhas do arquipélago encontram-se agrupadas em três grupos atendendo à sua proximidade geográfica. As ilhas Flores e Corvo formam o Grupo Ocidental, as ilhas Faial, Pico, São Jorge, Graciosa e Terceira compõem o Grupo Central e as ilhas São Miguel e Santa Maria, conjuntamente com os ilhéus das Formigas, definem o Grupo Oriental. A superfície terrestre do arquipélago dos Açores é de 2.322 km².

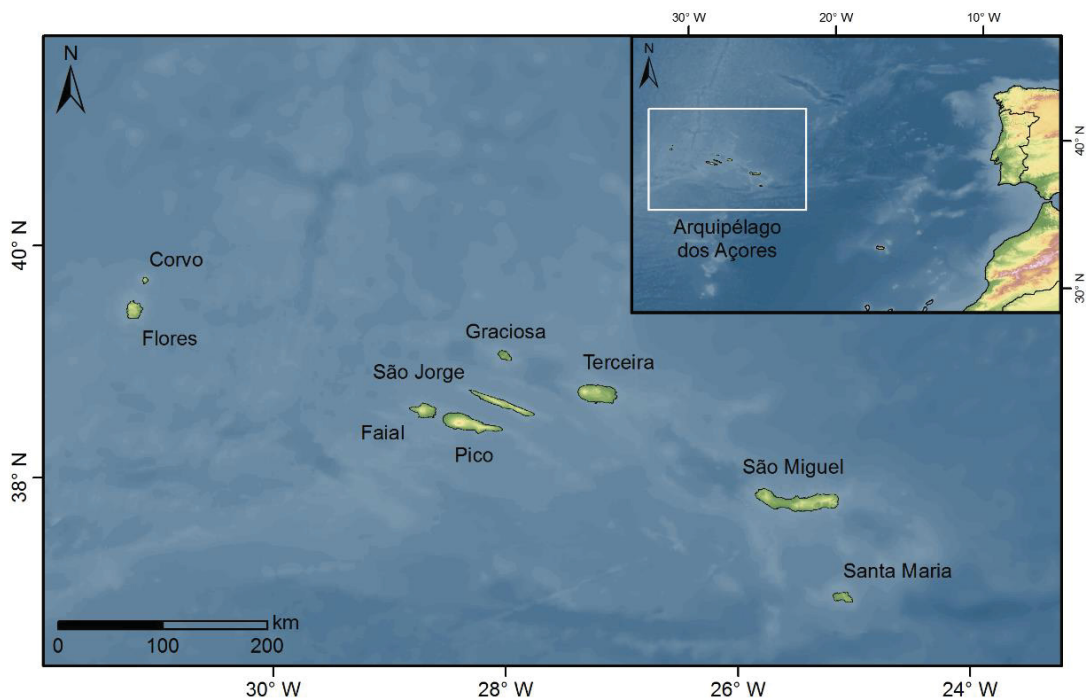


Figura 21 | Localização geográfica do Arquipélago dos Açores.

Para o testar o programa *ALSA Tools*, descrito em pormenor no capítulo 3, foi selecionada uma área de estudo que corresponde, *grosso modo*, a freguesia do Lajedo, localizada no extremo SW da ilha das Flores (Figura 22). Esta ilha apresenta uma área de 141 km² e representa 6,1 % do território regional.

Sob o ponto de vista administrativo, a ilha das Flores compreende 2 concelhos: Santa Cruz das Flores (70,9 km²) e Lajes das Flores (70,1 km²), subdivididos em 4 e 7 freguesias, respetivamente, Caveira, Cedros, Ponta Delgada e Santa Cruz; Fajã Grande, Fajãzinha, Fazenda, Lajedo, Lajes, Lomba e Mosteiro.

A delimitação da área de estudo teve como principal critério a coerência do território sob o ponto de vista hidrológico e geomorfológico. Assim, o limite da área de estudo foi definido pela envolvente ao conjunto das oito bacias hidrográficas integralmente inseridas na freguesia do Lajedo ou que, de forma fracionada, drenam para o seu interior. Assim sendo, a área de estudo apresenta uma área de 7,73 km².

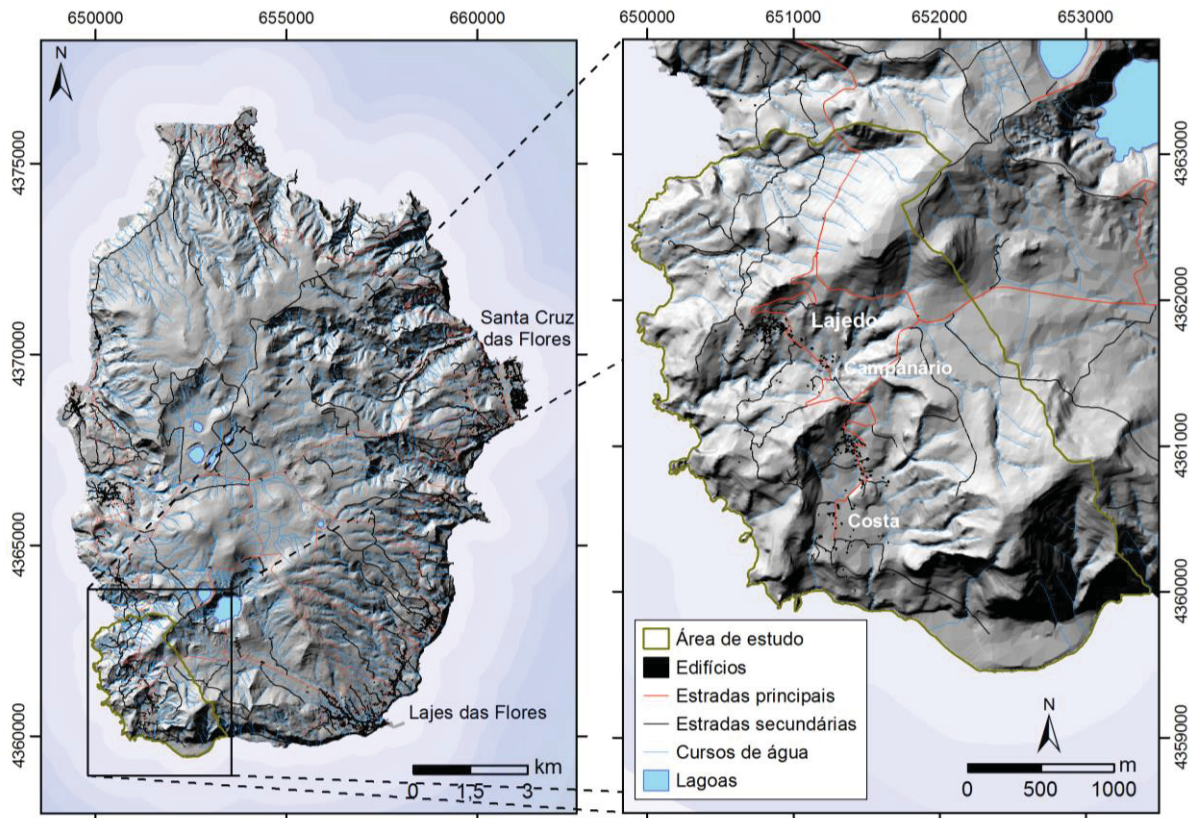


Figura 22 | Enquadramento geográfico da área de estudo.

4.1.2. Atividade geomorfológica histórica

A freguesia do Lajedo na ilha das Flores, é um dos locais no arquipélago dos Açores recorrentemente afetado por movimentos de vertente. Eventos de instabilidade geomorfológica, ocorridos no final do século XVIII e durante o século XIX, são relatados por alguns autores históricos.

A este propósito, Camões (1822) relata que: *“Em 1799, em uma pequena povoação chamada Lagêdo, ao Sueste da ilha, pelas duas horas da tarde, começaram a abalarem-se varios rochedos, e terras cultivadas de trigo, sitos sobre elles, aonde andavam ceifoens na colheita dos trigos; e, em menos de uma hora, revolveo terras de inhames de tal forma que ficaram as de baixo para cima, e as de cima para baixo; foi um fenomeno que daria que faser aos naturalistas se cá os houvesse”*. Silveira (1848) descreve (possivelmente) o mesmo evento: *“A freguesia do Lajedo e Costa na época de 1773 sofreu no lugar chamado Campanário, no mês de Julho, um abalo de terra em parte de uma montanha: cujo abalo apenas foi sentido naquele lugar e cuja catástrofe se diminui a altura desta montanha mais de 60 pés, em distância de 2 moios de terreno”*. Quanto ao ano é possível tratar-se de um *lapsus calami* uma vez que Drummond (1856) transcreve integralmente o relato de Camões (1822) e Macedo (1871) descreve o mesmo evento, dando um ano diferente e a informação (provavelmente mal interpretada na fonte) de que o fator desencadeante terá sido um sismo: *“Em julho deste anno [1793] sentio-se pela primeira vez na ilha das Flores depois della descoberta um terramoto que abateu na freguesia do Lagedo no logar da Ribeira do Campanario uma montanha na altura de 18 metros que obstruiu uma extensão de 1161,60 ares de terreno”*.

No ano de 1800 é descrito outro evento por Silveira (1848): *“...na mesma montanha [Campanário] e noutra lado (...) correu ao mar mais de um moio de terreno: e apareceu no meio deste lugar um manancial de águas minerais frias, que davam como de tinta preta, suprimindo a falta de caparrosa. Estas águas secaram no fim de três anos”*. Macedo (1871) narra o mesmo evento, relatando que: *“...e em 1800 por efeito d’outro terramoto (...) a 29 de dezembro (...) na ilha das Flores, no mesmo sítio da Ribeira do Campanário, correu ao mar uma montanha em grande extensão, patenteando um manancial d’águas frias, que tingiam de preto o que nelas se metia, e assim continuaram por um espaço de três annos, no fim dos quaes se secaram”*.

Outros dois eventos de instabilidade geomorfológica desencadeados por sismos, ocorridos na noite de 16 e 17 de outubro de 1845 e a 8 de março de 1846, são relatados por Silveira (1848). O autor correlaciona estes movimentos de vertente com a presença da nascente hidrotermal no sítio da Água Quente no lugar da Costa, provavelmente pretendendo enfatizar a influência e o contexto hidrológico da área na ocorrência dos

movimentos de vertente, uma vez que aquando do relato se desconhecia o local exato daquela nascente hidrotermal.

A 22 de maio de 1980 ocorreu um movimento de vertente de grandes dimensões, do tipo desabamento, no local denominado Rocha Alta. O movimento de vertente foi desencadeado numa arriba com cerca de 300 metros de altura, apresentando atualmente um depósito com cerca de 1.000 metros de largura e cerca de 400 metros de comprimento, certamente menor do que aquele formando aquando da sua ocorrência devido à dinâmica litoral. No jornal “As Flores”, de 12 de junho de 1980, é noticiado que o desabamento terá ocorrido ao anoitecer, altura em que muitos pescadores no cais das Lajes, perplexos, viram o mar subir acima dos seus limites habituais, submergindo os barcos que se encontravam varados, o próprio cais e passando a água sobre os muros de proteção costeira. Borges *et al.* (2008) calcularam para este tsunami uma intensidade de grau IV-V na escala de Papadopoulos-Imamura (2001) e um *run-up* de 5 metros na ilha das Flores.

Recentemente, a 3 de dezembro de 2010, episódios de precipitação intensa e prolongada desencadearam algumas dezenas de movimentos de vertente provocando danos em habitações, interrupção de estradas e retirada de pessoas nas freguesias do Lajedo e Fajãzinha. A 30 de outubro de 2012, devido igualmente à precipitação intensa foram desencadeados movimentos de vertente, alguns deles reativados, que provocaram interrupções e danos em estradas.

4.1.3. Enquadramento geodinâmico

As ilhas dos Açores correspondem a edifícios vulcânicos emergentes da designada Plataforma dos Açores, uma região de forma grosseiramente triangular, definida pela linha batimétrica dos 2000 m (Needham e Francheteau, 1974). Sob o ponto de vista geoestrutural, os Açores situam-se na zona de junção tripla das placas litosféricas Norte Americana (NA), Eurasiática (EU) e Núbica (NU), facto que se reflete na presença de importantes estruturas tectónicas, das quais se salienta a Crista Média Atlântica (CMA), a Zona de Fratura Açores-Gibraltar, que inclui o *Rift* da Terceira e a Falha Gloria, e a Zona de Fratura Leste dos Açores (Figura 23).

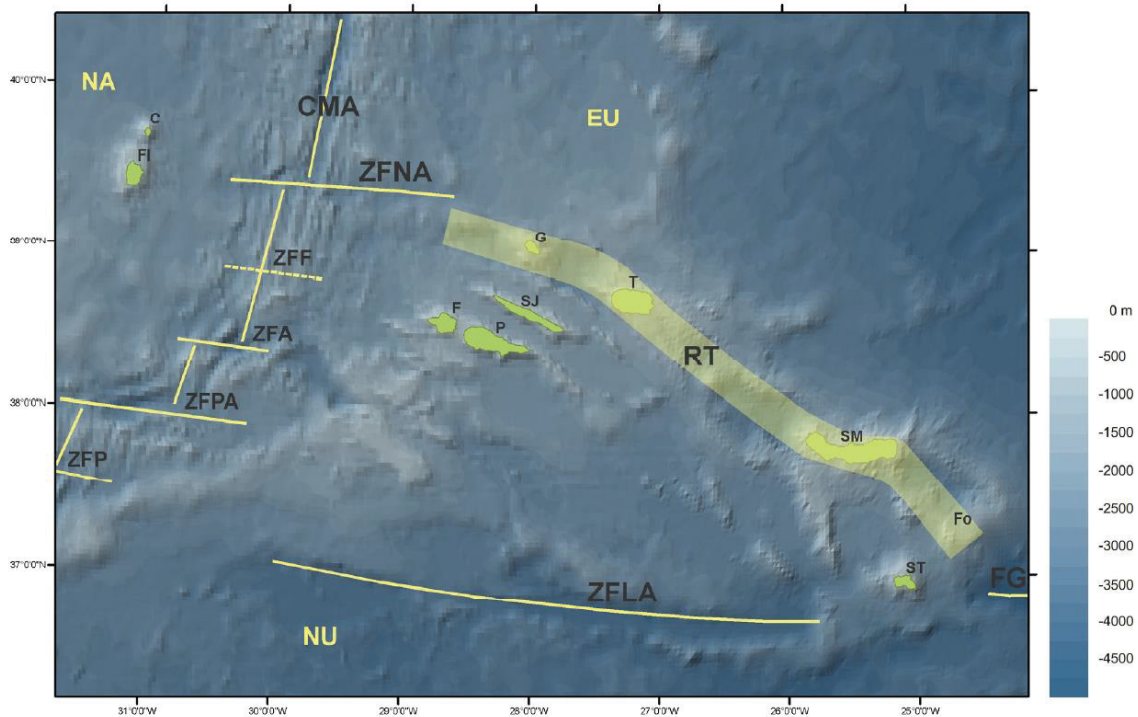


Figura 23 | Elementos morfotectónicos da região dos Açores (Hipólito, 2009).

Legenda: NA – placa Norte Americana; EU – placa Eurasiática; NU – placa Núbica; CMA – Crista Média Atlântica; ZFK – Zona de Fratura Kurchatov; ZFNA – Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFF – Zona de Fratura do Faial; ZFA – Zona de Fratura Açor; ZFPA – Zona de Fratura Princesa Alice; ZFP – Zona de Fratura do Pico; ZFLA – Zona de Fratura Leste dos Açores; RT – Rift da Terceira; FG – Falha Gloria; FI – Flores; C – Corvo; G – Graciosa; T – Terceira; SJ – S. Jorge; F – Faial; P – Pico; SM – S. Miguel; ST – Sta. Maria; Fo – Ilhéus das Formigas.

Consequência do seu enquadramento geodinâmico, a região dos Açores tem registado intensa atividade sísmica e vulcânica desde o seu povoamento, em particular ao longo da Crista Média Atlântica e do *Rift* da Terceira (*s.l.*). A atividade sísmica no arquipélago é marcada por eventos no geral de magnitude intermédia a baixa, ocorrendo ocasionalmente eventos com magnitude superior a 5 na Escala de Richter. Desde o povoamento dos Açores, no século XV, estão relatados 31 sismos destruidores responsáveis por inúmeras mortes e importantes danos materiais (Figura 24, Gaspar *et al.*, 2015).

A ilha das Flores situa-se na placa Norte Americana, a W da Crista Média Atlântica, ou seja, numa área sismogénica pouco ativa, essencialmente ameaçada pela ocorrência de sismos de elevada magnitude ao nível da Crista Média Atlântica.

A atividade eruptiva histórica no arquipélago dos Açores inclui 28 erupções, entre eventos submarinos e subaéreos, que cobrem uma grande diversidade de estilos eruptivos e magnitudes (Figura 25, Gaspar *et al.*, 2015). À semelhança da sismicidade, o vulcanismo ocorre ao longo do eixo de orientação geral WNW-ESE, havendo a registar, desde o povoamento das ilhas, erupções nas ilhas do Pico, Faial, Terceira, S. Jorge e S. Miguel. Na ilha das Flores não existe qualquer registo de atividade vulcânica histórica. Contudo, a história geológica recente da ilha demonstra a possibilidade da ocorrência de tal tipo de episódios no futuro, dada a ocorrência de manifestações de vulcanismo secundário, como a nascente hidrotermal da Costa do Lajedo, a existência de formas vulcânicas bem preservadas e o reconhecimento de depósitos freatomagmáticos com cerca de 2.000 a 3.000 anos (Azevedo, 1999).

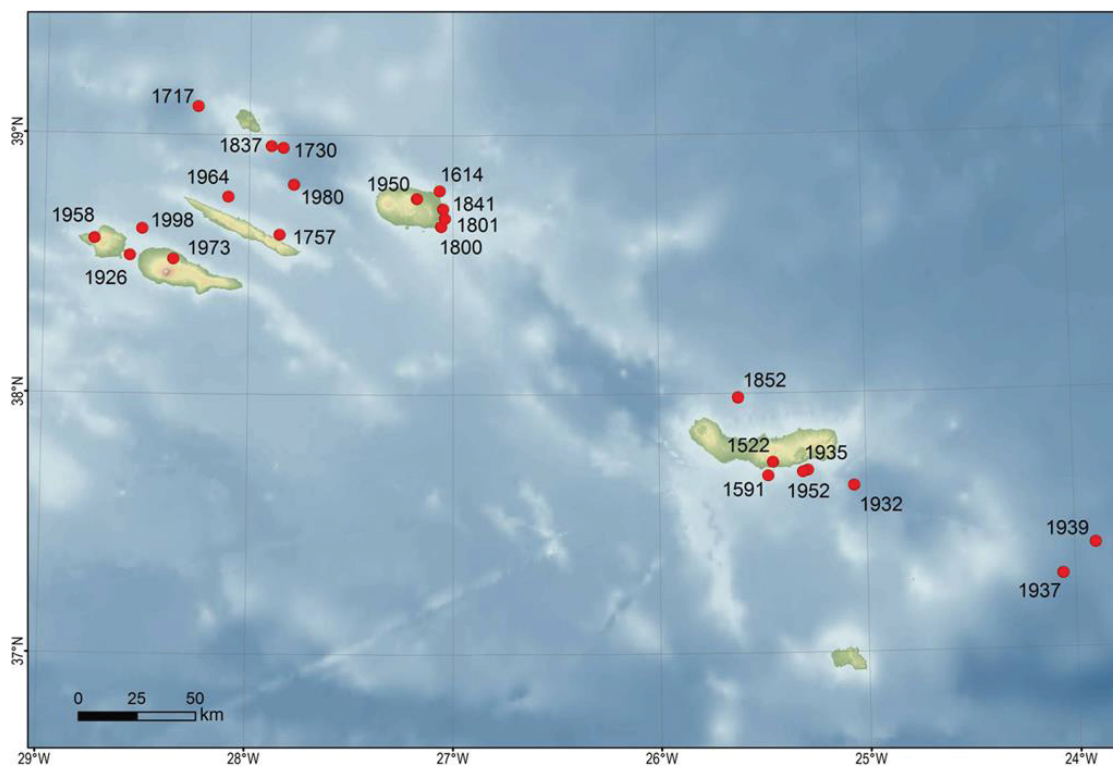


Figura 24 | Localização dos sismos históricos no arquipélago dos Açores (Gaspar *et al.*, 2015).

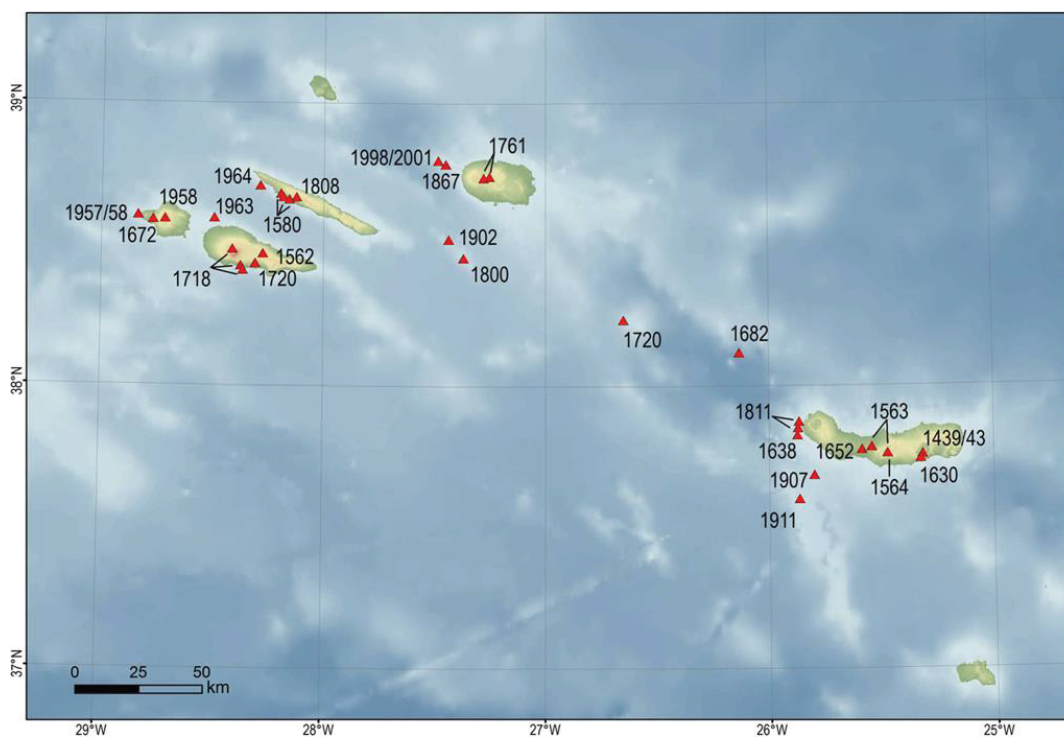


Figura 25 | Localização das erupções vulcânicas históricas do arquipélago dos Açores (Gaspar *et al.*, 2015).

4.1.4. Caraterização demográfica

A freguesia do Lajedo apresenta uma área de 6,73 km² sendo constituída pelos lugares do Lajedo (sede da freguesia), Campanário e Costa.

Com base em dados demográficos para o período entre 1864 e 2011 verifica-se que a ilha das Flores, tal como a freguesia do Lajedo em particular, apresenta uma tendência de decréscimo gradual do número de residentes desde o terceiro quartil do século XIX até ao presente (Figuras 26 e 27).

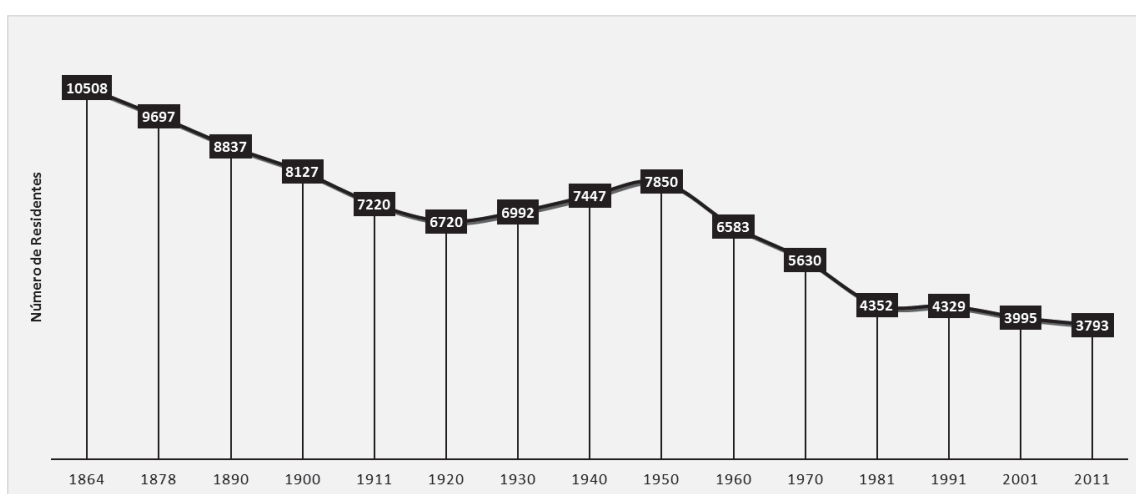


Figura 26 | Evolução demográfica da ilha das Flores entre 1864 e 2011.

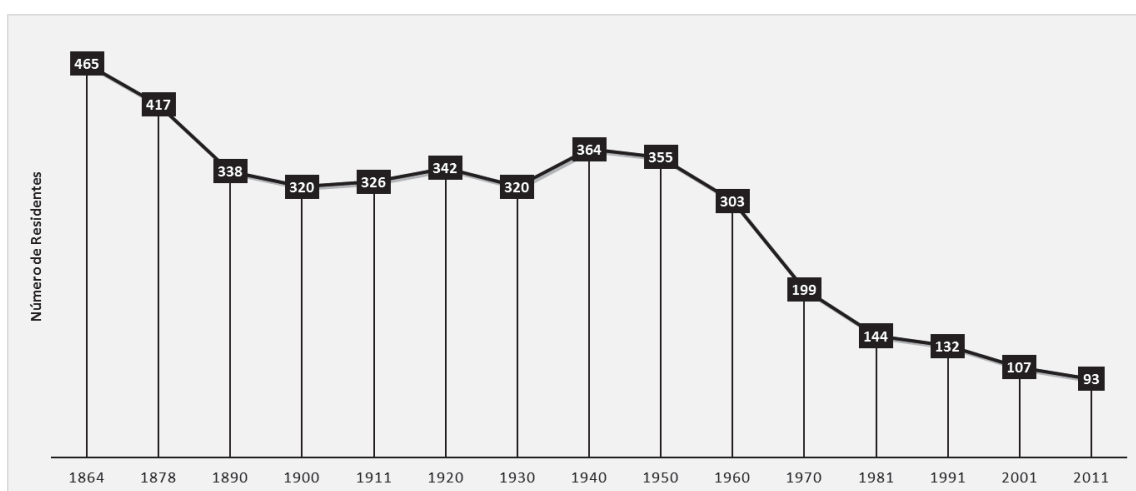


Figura 27 | Evolução demográfica da freguesia do Lajedo entre 1864 e 2011.

Pela análise pormenorizada das figuras 26 e 27, observa-se na ilha das Flores um decréscimo acentuado do número de residentes entre 1864 e 1920, seguindo-se um período de crescimento até 1950. A freguesia do Lajedo apresenta um decréscimo acentuado do número de residentes entre 1864 e 1890, seguindo-se um período de brando crescimento até 1940, apenas perdendo cerca de 22 habitantes durante a década de 1920. Em 1950 e 1940, a ilha das Flores e a freguesia do Lajedo, atingem o máximo populacional do século XX, com 7.850 e 364 residentes, respetivamente.

Entre 1960 e 1981 verifica-se um decréscimo muito significativo do número de residentes na ilha das Flores. Na freguesia do Lajedo o decréscimo dá-se a partir da década de 1940. Após 1981 e até 2011 dá-se uma ligeira estabilização do número de residentes na ilha, apresentando uma variação negativa na ordem de 13%. Contrariamente a esta tendência verifica-se para a freguesia do Lajedo a continuação do decréscimo acentuado do número de residentes.

4.1.5. Caraterização geomorfológica e geológica

a) Geomorfologia

A ilha das Flores apresenta uma forma aproximadamente elíptica, com um ligeiro alongamento na direção N-S. Com um comprimento de 16,5 km e largura de 11,5 km, apresenta uma área emersa de 143 km², sendo a cota máxima da ilha aos 915 m no Morro Alto.

Do ponto de vista geomorfológico, Azevedo (1999) identifica dois domínios com características distintas: o Maciço Central e a Orla Periférica. Como se pode constatar pela figura 28, a área de estudo está contida maioritariamente na zona periférica do Maciço Central, abrangendo parcialmente, a nordeste e sudoeste, o *Plateau* Central. No domínio da Orla Periférica, a área de estudo abrange toda a faixa costeira, a sul e a oeste, está contida na zona de escarpa. Na zona de plataforma, inserem-se o lugar da Costa e o depósito da Rocha Alta. Neste contexto, a área de estudo apresenta uma geomorfologia diversificada, cujas características se enunciam de forma sucinta.

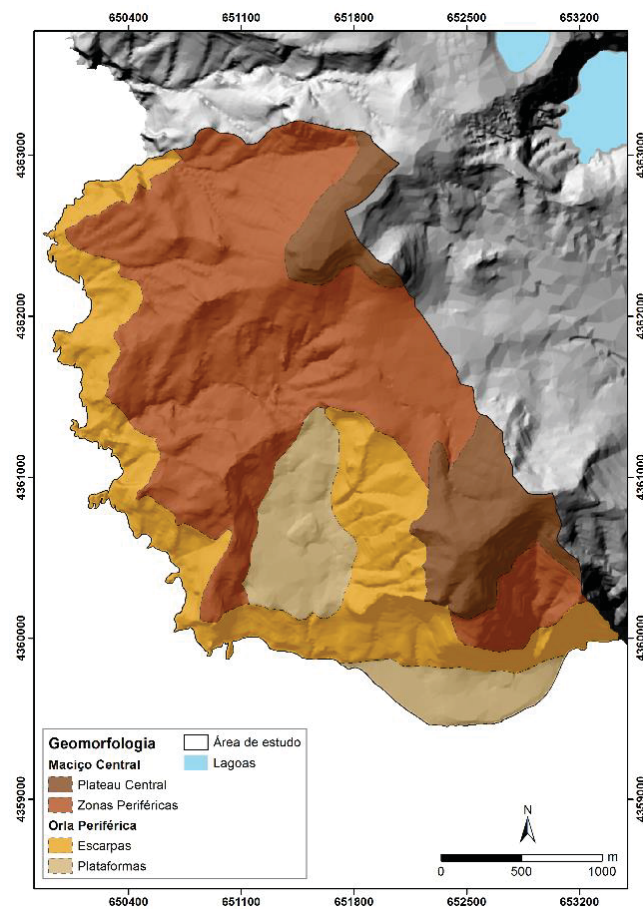


Figura 28 | Carta geomorfológica da área de estudo (adaptado de Azevedo, 1999).

O Maciço Central engloba o *Plateau* Central, uma extensa área aplanada que ocupa a zona central da ilha, definida grosseiramente pela curva de nível dos 500 m de altitude, e as zonas adjacentes que se estendem até ao topo das escarpas costeiras ou interiores (Azevedo, 1999). A passagem para a Orla Periférica ocorre, quase sempre, através de imponentes escarpas com declives superiores a 40°, com exceção das regiões de Santa Cruz e do Porto das Lajes.

No domínio da Orla Periférica, zona que abrange as escarpas e as plataformas de sopé adjacentes ao Maciço Central, a ilha é caracterizada pela existência de arribas fósseis, algumas constituídas por imponentes escarpas com mais de 600 m de altura e o litoral caracteriza-se predominantemente por arribas altas e alcantiladas.

A orla sul da área de estudo apresenta uma escarpa que se estende por toda a costa sul da ilha e que atinge a cota máxima na Rocha Alta (cerca de 550 m). Na base da Rocha Alta desenvolve-se uma fajã resultante da ocorrência de um grande movimento de vertente do tipo desabamento, em 1980 (secção 4.1.2). Ainda na orla sul destaca-se a presença de uma arriba fóssil, situada a leste da Costa do Lajedo, cuja cota máxima aproxima-se dos 450 m. Na base desta arriba encontra-se a plataforma de abrasão marinha da Costa do Lajedo (Azevedo e Portugal Ferreira, 1996), a uma cota compreendida entre os 150 e os 200 m.

A orla oeste apresenta-se muito recortada e alcantilada, com arribas que atingem cerca de 160 m de altura. Constitui exceção a zona costeira do Porto do Lajedo, mesmo que neste local o acesso ao mar se efetue invariavelmente através de uma zona com declive acentuado. Neste troço da costa há mais de uma dezena de ilhéus que podem atingir os 65 m de altura (Ilhéu do Cartário). As principais ribeiras existentes neste sector desembocam através de vales fortemente encaixados, como são os casos das ribeiras do Campanário e da Lapa.

b) Tectónica

Sob o ponto de vista estrutural, na área de estudo é possível distinguir três famílias principais de falhas e filões (Azevedo, 1999; Gaspar *et al.*, 1999; Figura 29). Observam-se estruturas com direções entre N30°-40°, com provável continuidade para domínios submarinos e que deverão corresponder ao prolongamento das falhas transformantes que intercetam a CMA. Estruturas com direções entre N15°-30°, cuja maioria possui natureza vertical a sub-vertical com reduzida extensão. Estas estruturas condicionam o próprio edifício insular que suporta as ilhas das Flores e Corvo, o traçado de algumas linhas de água sendo também

responsáveis pela irregularidade da orla costeira na área de estudo. São ainda observadas estruturas com direção N-S, apesar da sua expressão estar subordinada à das famílias anteriores.

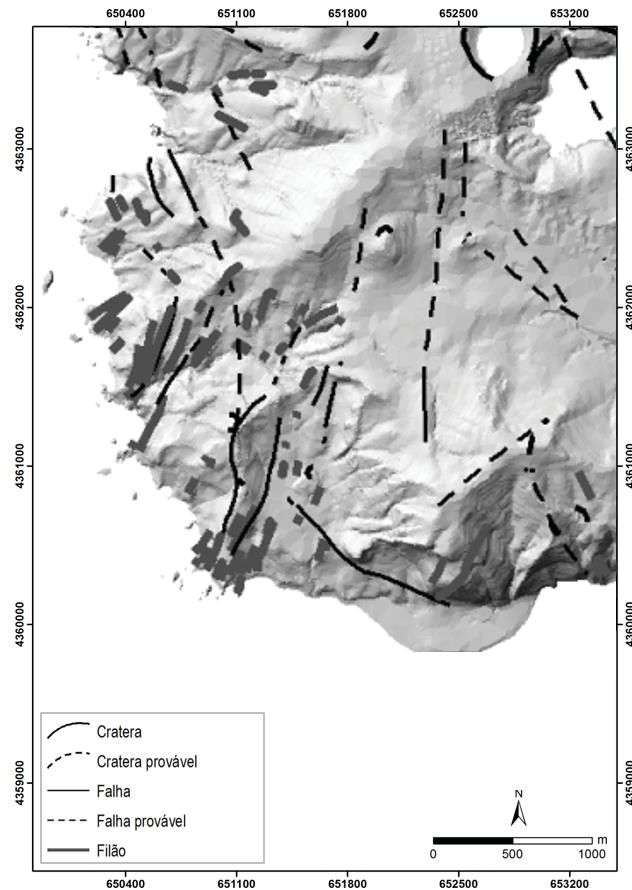


Figura 29 | Esboço vulcano-tectónico da área de estudo (Azevedo, 1999; Gaspar *et al.*, 1999).

c) Geologia

A primeira carta geológica da ilha das Flores foi elaborada por Zbyszewski *et al.* (1968), à escala 1:25.000, na qual os autores consideraram cinco unidades vulcanoestratigráficas, posteriormente reformuladas por Azevedo *et al.* (1986). Posteriormente, Azevedo (1999), retomando a metodologia utilizada em 1986, elaborou uma nova carta geológica para a ilha das Flores com uma nova geocronologia, dados petrográficos e geoquímicos, bem como uma descrição da tectónica e geomorfologia, à escala 1:15.000 onde, genericamente, considera dois grandes complexos vulcânicos: o Complexo de Base (CB) e o Complexo Superior (CS) (Tabela 3).

Tabela 3 | Escala vulcanoestratigráfica para a ilha das Flores (Azevedo e Portugal Ferreira, 2006).

Complexo	Unidade	Subunidade	Idade (Ma)
Complexo Superior (CS)	Superior - CS3	Depósitos hidromagmáticos e freáticos - H	0,002
		Cones de escórias - G	0,003
	Intermédio - CS2	Havaítos intermédios - F	0,22
		Basaltos intermédios - E	0,4
	Inferior - CS1	Benmoreítos - traquitos inferiores - D	0,55
		Havaítos - mugearitos inferiores - C	
		Basaltos - havaítos inferiores - B	
		Basaltos inferiores - A	0,67
Complexo de Base (CB)	Superior - CB1	Brechas e tufo palagonitizados - a	0,70 - 0,80
		Basaltos e havaítos palagonitizados - b	1,0 - 1,5
		Brechas palagonitizadas - c	≅ 1,8
	Inferior - CB2	Basaltos palagonitizados - d	2,0 - 2,2
		Depósitos vulcanoclásticos palagonitizados - e	

O Complexo de Base apresenta idades compreendidas entre 2,2 Ma e 0,80 Ma (Azevedo e Portugal Ferreira, 2006) e inclui todas as formações, produtos e estruturas vulcânicas resultantes da atividade submarina e emergente, que em consequência da evolução geotectónica e geomorfológica da ilha e das oscilações quaternárias do nível médio das águas do mar, afloram em domínios subaéreos em locais restritos (Azevedo, 1999).

Esta unidade ocupa, naturalmente, os níveis vulcanoestratigráficos inferiores e aflora com maior expressão na orla costeira, principalmente nos sectores SW e NE da ilha, mas também em locais recuados relativamente à linha de costa atual. Com base neste critério, os afloramentos deste complexo foram divididos no Complexo de Base Sudoeste e no Complexo de Base Nordeste.

O Complexo Superior, onde se incluem todas as formações e estruturas vulcânicas resultantes do vulcanismo subaéreo, apresenta idades compreendidas entre os 0,67 Ma e 0,002 Ma (Azevedo e Portugal Ferreira, 2006) e ocupa os níveis estratigráficos intermédios e superiores da ilha, preenchendo todo o Maciço Central, prolongando-se até à linha de costa, ocupando entre 60% a 70% da Orla Periférica da ilha.

Com base em datações radiométricas e critérios estratigráficos, os Complexos de Base e Superior foram divididos em duas e três unidades respetivamente: Complexo de Base 1 (CB1) e Complexo de Base 2 (CB2)

integrando três (a, b e c) e duas subunidades (d e e), respetivamente; Complexo Superior 1 (CS1), Complexo Superior 2 (CS2) e Complexo Superior 3 (CS3) agregando quatro (A, B, C e D), duas (E e F) e duas subunidades (G e H), respetivamente.

Na área de estudo aflora todo o Complexo de Base Sudoeste compreendendo todas as unidades e subunidades do Complexo de Base.

A subunidade a é constituída exclusivamente por rochas vulcanoclásticas de natureza monolitológica básica, predominando as brechas piroclásticas. Esta subunidade apresenta-se cortada por diques vulcânicos, maioritariamente de natureza traquítica.

A subunidade b é constituída por sucessões de escoadas lávicas com intercalações de níveis de natureza vulcanoclástica, cujas espessuras máximas raramente ultrapassam os 40 m. É possível, apesar do elevado grau de alteração e litificação dos materiais, diferenciar três tipos litológicos, todos com estrutura maciça: (1) brechas amarelas ou acastanhadas, provavelmente resultantes da alteração de níveis hidroclásticos; (2) tufos azuis, oriundos da alteração de cinzas básicas; (3) lapilli-tufos negros com fragmentos de cristais de plagioclase e piroxena fortemente oxidados e argilizados.

A subunidade c é constituída por rochas vulcanoclásticas monolitológicas de natureza básica com elevado grau de alteração e de litificação secundária. Contrariamente às subunidades que compõem o CB1, esta apresenta elevada percentagem de fragmentos de natureza autoclástica. Exibe também um grande número de diques, sobretudo de natureza basáltica, mas também de natureza traquítica, pertencentes ao CS que atravessam esta subunidade.

A subunidade d é constituída por vulcanitos básicos, nomeadamente basaltos e hawaítos com acentuado grau de alteração, expressando grandes semelhanças litológicas com a subunidade b do CB1. As diferenças, ainda que ligeiras, situam-se ao nível petroquímico e da estrutura interna. Para além das estruturas maciças e de fluência, ocorrem nesta subunidade estruturas interpretadas como claramente resultantes da construção em ambiente submarino, nomeadamente *pillow lavas*, na Costa do Lajedo.

A subunidade e corresponde ao nível estratigráfico mais antigo da geologia da ilha das Flores e aflora apenas na base da arriba costeira oeste da área de estudo.

Na área de estudo afloram todas as unidades e subunidades do Complexo Superior à exceção da subunidade H, a mais recente da estratigrafia da ilha. A subunidade A é constituída por sucessões de escoadas lávicas basálticas intercaladas com níveis piroclásticos grosseiros, cuja espessura máxima atinge

os 100 m nas escarpas da Rocha Alta. Os níveis piroclásticos são constituídos maioritariamente por escórias com estrutura móvel (*open framework*) ou soldada (*clinker*). Exibem grau de alteração variável que se expressa no largo espectro de tonalidades variável entre o negro e o avermelhado.

A subunidade B é composta por uma série de escoadas frequentemente intercaladas com níveis piroclásticos. Na base da série as escoadas são de natureza basáltica e nos níveis intermédio e superior os vulcanitos apresentam natureza hawaítica. Os níveis piroclásticos são constituídos por escórias soltas ou moderadamente soldadas com considerável grau de alteração e uma espessura invariavelmente subordinada à das bancadas lávicas adjacentes.

A subunidade C é constituída por uma série de escoadas localmente intercaladas com níveis piroclásticos apresentando espessuras unitárias superiores a 6 m na área de estudo (por exemplo, a Rocha dos Bordões e o Bugio). Na base da subunidade encontramos escoadas de natureza claramente hawaítica. Nos níveis intermédios e superiores os vulcanitos evoluem para termos mugaríticos. Os níveis piroclásticos apresentam estrutura friável e uma distribuição espacial muito mais restrita do que a das bancadas lávicas encaixantes. São constituídos por piroclastos grosseiros, com forma arredondada e pouco vesiculados. Apresentam baixo grau de alteração.

A subunidade D apresenta vulcanitos em dois tipos morfológicos: sub-horizontais, correspondentes a escoadas, e verticais ou sub-verticais, nomeadamente agulhas-chaminés e diques. Na área de estudo apenas afloram as últimas sendo a formação do Castelo uma das principais agulhas-chaminés presentes na ilha e a W do Lajedo e o Pináculo do Campanário, os diques com maior expressão.

A subunidade E é composta por escoadas lávicas, que dominam em termos volumétricos esta subunidade, e que apresentam com alguma frequência, níveis piroclásticos intermédios de espessura muito inferior. As escoadas são compostas por basaltos alcalinos, por vezes com tendência tefrítico-basanítica. Os níveis piroclásticos mais grosseiros apresentam normalmente estrutura não soldada. Também foram identificadas estruturas de escoamento (tipo *breccia-flow*) com soldagem primária inter-fragmentos.

A subunidade F é constituída por séries lávico-piroclásticas. As formações lávicas são de natureza hawaítica com algumas escoadas da base da série constituídas por basalto subafírico e não olivínico. As rochas piroclásticas desta subunidade ocupam uma pequena área a sudeste da área de estudo onde os piroclastos apresentam granulometria média a grosseira e estrutura móvel.

A subunidade G é a principal responsável pela grande dispersão de afloramentos do CS3 na superfície insular, uma vez que é constituída por cerca de 30 cones de escórias. A área de estudo apresenta dois cones de escórias na Costa do Lajedo. Os depósitos piroclásticos que compõem esta subunidade são de natureza básica, apresentam na maioria dos afloramentos granulometria grosseira a muito grosseira e são constituídos fundamentalmente por escórias.

4.1.6. Caracterização da precipitação

Para a caracterização da precipitação à uma escala local, recorreu-se à análise estatística dos dados de precipitação, referentes aos períodos compreendido entre os anos 1979-1991 e 1997-2016, da estação meteorológica do Aeroporto da ilha das Flores (Lat.: 39° 27'N; Long.: 31° 08'W; Alt.: 34 m), propriedade do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA).

Verifica-se alguma variabilidade na precipitação acumulada anual, sendo o mínimo e o máximo de 1.075,9 mm em 1998 e 2.148,6 mm em 2010, respetivamente (Figura 30). O valor da precipitação média anual corresponde a 1.525 mm.

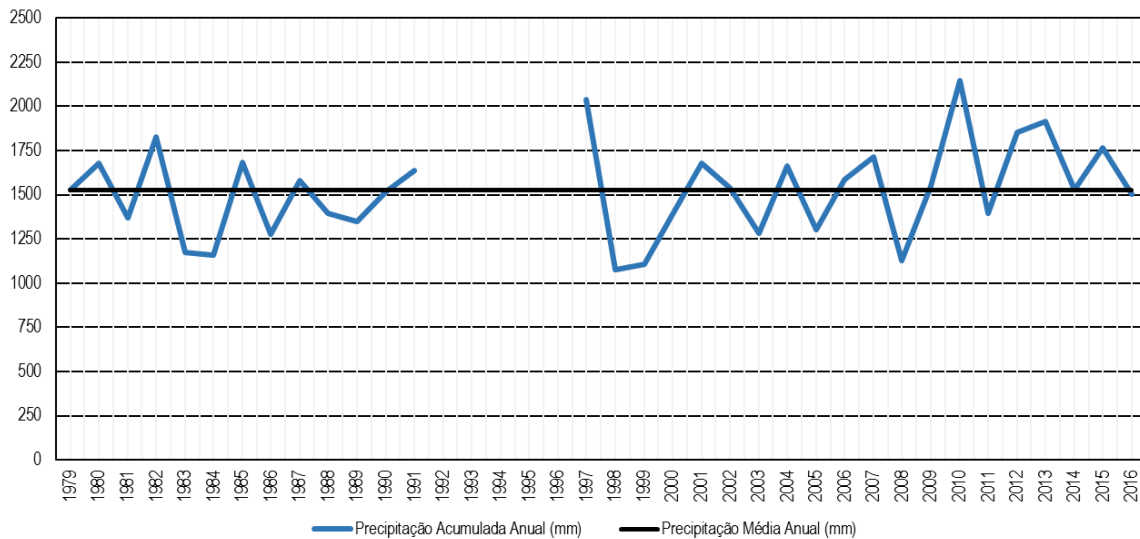


Figura 30 | Precipitação acumulada anual e precipitação média anual para a Estação Meteorológica do Aeroporto da Ilha das Flores, considerando os períodos entre os anos 1979 - 1991 e 1997 - 2016.

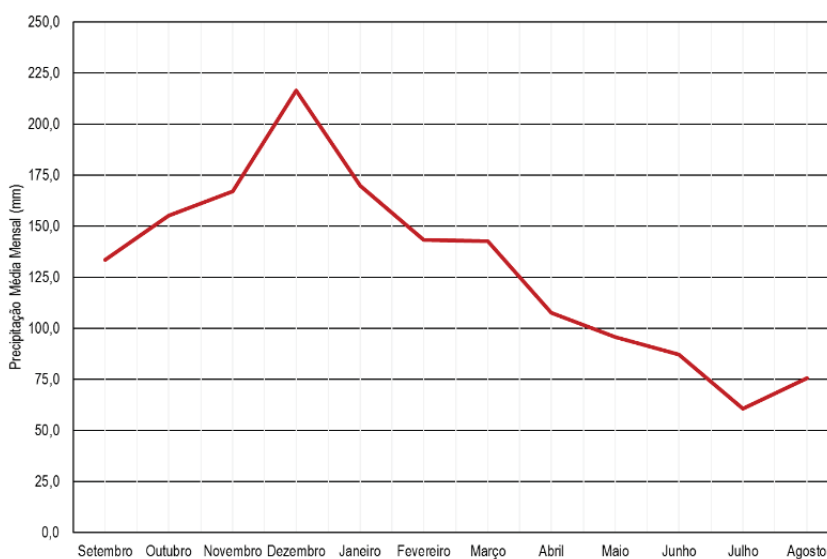


Figura 31 | Variação da precipitação média mensal para a Estação Meteorológica do Aeroporto da Ilha das Flores, considerando os períodos entre os anos 1979 - 1991 e 1997 - 2016.

Existe uma variação sazonal considerável nos quantitativos de precipitação, registando-se nos meses de outubro a março aproximadamente 64% do total da precipitação média anual, sendo dezembro o mês mais chuvoso (216,4 mm) (Figura 31). No mês de maio verifica-se a transição para um período menos chuvoso, atingindo-se o mínimo de precipitação no mês de julho (60,5 mm).

4.1.7. Caraterização da rede hidrográfica

Na área de estudo foram individualizadas sete bacias hidrográficas exorreicas e uma bacia arreica que estão inseridas na sua totalidade na freguesia do Lajedo ou que drenam para o seu interior (Figura 32). A bacia hidrográfica no extremo sudeste da área de estudo constitui uma exceção e foi incluída de modo a que o desabamento da Rocha Alta e respetivo depósito fossem incluídos na área de estudo.

A bacia hidrográfica arreica corresponde a uma bacia de pequena dimensão de ordem 3, na classificação de Strahler, com aproximadamente 0,51 km², localizada na plataforma da Costa do Lajedo. As sete bacias exorreicas individualizadas apresentam um padrão de drenagem dendrítico, à exceção da Ribeira do Loural, que apresenta um padrão de drenagem paralelo. A maioria das bacias hidrográficas delimitadas apresenta ordem 2 e 3, na classificação de Strahler, e não excedem os 0,79 km². As bacias hidrográficas de maior dimensão apresentam ordem 4, na classificação de Strahler: a bacia hidrográfica da Ribeira do Campanário que com uma área de 2,16 km² inclui a zona urbana do lugar do Lajedo e do Campanário e a bacia hidrográfica da Ribeira da Lapa, com 0,89 km², que limita a norte a área de estudo.

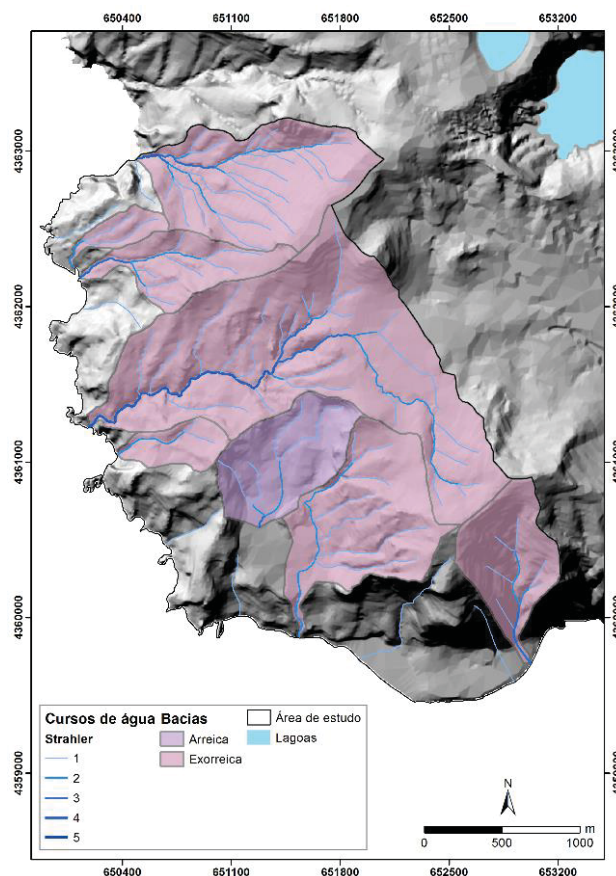


Figura 32 | Bacias hidrográficas da área de estudo.

4.2. DADOS DE ENTRADA PARA A MODELAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE

4.2.1. Inventariação dos movimentos de vertente

A elaboração do inventário de movimentos de vertente para a área de estudo permitiu a criação de um inventário do tipo histórico, ou seja, um inventário que resulta da cartografia de todos os movimentos de vertente que ocorreram ao longo do tempo não estando associados a um fator desencadeante específico (Malamud *et al.*, 2004).

A inventariação dos movimentos de vertente envolveu duas etapas distintas. Na primeira etapa foi realizado o reconhecimento e cartografia de todos os movimentos de vertente à escala 1:1.000 utilizando o ortofoto da ilha das Flores do ano 2004 (DSCIG-SRCTE), com escala 1:5.000 e resolução de 0,6 m. Para esta tarefa foi ainda utilizada uma imagem do *Google Earth*, devidamente georreferenciada, do ano 2013 com escala 1:5.000 e resolução de 0,4 m. A cartografia de movimentos de vertente nesta etapa tornou-se também a única forma de inventariar os movimentos de vertente em locais inacessíveis ou sem linha de vista para a sua observação no campo, como é o caso da linha de costa. Para uma melhor identificação dos movimentos de vertente na orla costeira foram ainda utilizadas fotografias feitas durante os trabalhos do Plano de Ordenamento da Orla Costeira da Ilha das Flores (Pacheco *et al.*, 2006).

Na segunda etapa foi efetuado o inventário de campo na qual se realizou um sistemático levantamento da instabilidade geomorfológica da área de estudo, validando e retificando os movimentos de vertente identificados na fase anterior, bem como a adição de novos movimentos de vertente que não foram identificados pela interpretação do ortofoto e da imagem do *Google Earth* devido à sua dimensão ou recente desencadeamento. Para o efeito, a área de estudo foi seccionada em 17 folhas de campo à escala 1:1.500 cobrindo, cada uma, uma área de aproximadamente 0,45 km². Dada a cartografia de base para a área de estudo apenas existir à escala 1:25.000, a sua utilização revelou-se pouco útil para este objetivo específico de trabalho.

O levantamento de campo foi realizado durante o mês de novembro de 2016, adotando-se a metodologia de Soeters e van Westen (1996) baseada nas principais características que os diferentes tipos de movimentos de vertente deixam na morfologia do terreno, na vegetação e na rede de drenagem.

O inventário da área de estudo resultou na identificação de 474 movimentos de vertente, 171 dos quais são desabamentos (Figura 33) e 303 são deslizamentos (Figura 34), cartografados sob a forma de polígonos, correspondentes ao contorno exterior das cicatrizes dos movimentos de vertente (Figura 35). O inventário abrange uma área instabilizada de 409.259,3 m² e uma densidade aproximada de 61,3 movimentos de vertente por km² (Tabela 4).



Figura 33 | Exemplos de desabamentos identificados e cartografados na área de estudo.



Figura 34 | Exemplos de deslizamentos identificados e cartografados na área de estudo.

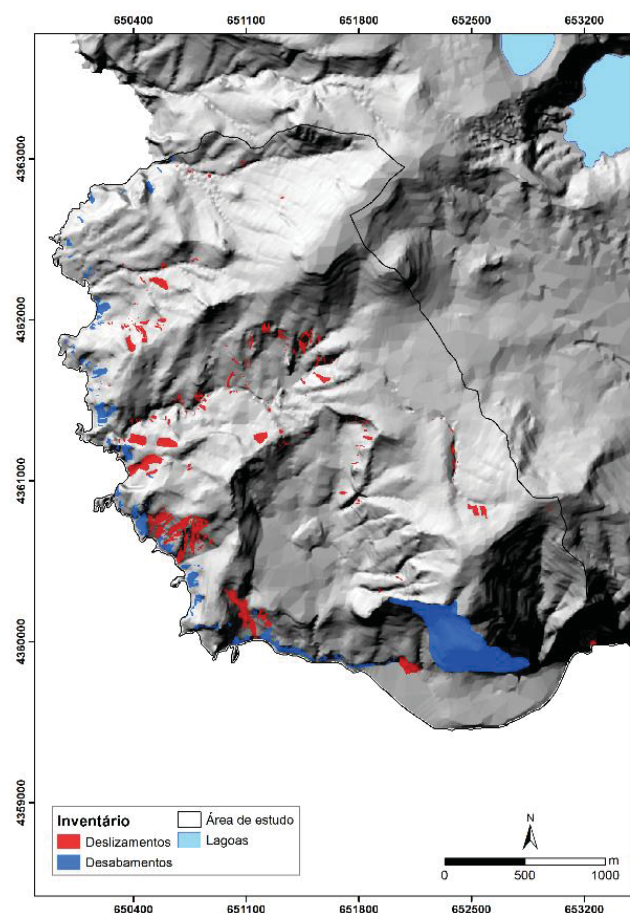


Figura 35 | Distribuição espacial dos movimentos de vertente por tipologia cartografados na área de estudo.

Tabela 4 | Resumo do inventário de movimentos de vertente.

Tipologia	Nº de movimentos de vertente	Área instabilizada (m ²)	Densidade (número/km ²)	Densidade (m ² /km ²)
Desabamentos (DSB-TOT)	171	248.560,9	22,1	32.155,4
Deslizamentos (DSL-TOT)	303	160.698,4	39,2	20.788,9
Inventário Total (MV-TOT)	474	409.259,3	61,3	52.944,3

4.2.2. Fatores de predisposição

Foram selecionados 12 fatores de predisposição para a modelação que se dividem em dois grupos distintos: variáveis derivadas do Modelo Numérico de Elevação (MNE) e variáveis ambientais (caraterísticas físicas do território). A altitude, o declive, a exposição, o perfil longitudinal das vertentes, o perfil transversal das vertentes, a área de contribuição, o inverso do *wetness index* e a insolação potencial, correspondem aos fatores de predisposição derivados do MNE. A distância aos cursos de água, a geologia, a densidade de drenagem e o uso do solo, foram as variáveis ambientais consideradas. Todos os fatores de predisposição foram transformados numa estrutura matricial (5x5 m).

O Modelo Numérico de Elevação (MNE) foi produzido pela definição de uma rede irregular triangulada (TIN – *Triangulated Irregular Network*), com base na cartografia de base em formato digital para a área de estudo, à escala 1:25.000, tendo em consideração as curvas de nível com uma equidistância de 10 m e os pontos cotados (IGeoE, 2000). Com o objetivo de melhorar a qualidade do MNE foi efetuada a identificação e eliminação das depressões (*sinks*), erros resultantes do processo de triangulação, e elaborado um MNE-corrigido. A altitude resultou da transformação direta do TIN recorrendo à extensão *3D Analyst Tools* do programa ArcGIS 10.4. O cálculo do declive, da exposição, do perfil longitudinal e transversal das vertentes, da insolação, da distância aos cursos de água e da densidade de drenagem foi efetuado de forma automática com base no MNE, utilizando para tal a extensão *Spatial Analyst Tools* do programa ArcGIS 10.4.1. A área de contribuição e o inverso do *wetness index* foram produzidos utilizando a extensão TauDEM 5.3 (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*, Tarboton *et al.*, 2015) desenvolvida para ArcGIS 10.4, com base no MNE-corrigido.

A tabela 5 apresenta um resumo dos fatores de predisposição na determinação da suscetibilidade a movimentos de vertente, em trabalhos realizados para o arquipélago dos Açores. Da sua análise, podemos inferir que o tipo de variáveis utilizadas na determinação da suscetibilidade a movimentos de vertente tem vindo a aumentar ao longo dos anos, devido em grande parte ao aumento do rigor dos trabalhos e capacidade de armazenamento de informação.

Tabela 5 | Resumo dos fatores de predisposição utilizados na avaliação da suscetibilidade de movimentos de vertente em trabalhos realizados para o arquipélago dos Açores.

Autores	Fatores de Predisposição															
	ALT	DEC	EXP	PTR	PLG	INS	IWI	DCA	CRV	DDR	ACT	LIT	USO	DEP	PRE	TPI
Gomes (2003)		x										x				
Goulart (2004)		x										x				
Medeiros (2004)		x										x				
Resendes (2004)		x										x				
Lameiras (2006)		x										x				
Marques <i>et al.</i> , 2007		x	x									x		x		
Marques <i>et al.</i> , 2009	x	x	x				x	x	x		x	x	x			
Marques (2013)	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x			
Marques <i>et al.</i> , 2015	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x			
Miguel (2016)		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	
Gordo (2017)	x	x	x	x		x	x					x	x			x

Legenda: ALT – Altitude; DEC – Declive; EXP – Exposição; PTR – Perfil transversal do Talude; PLG – Perfil longitudinal do talude; IWI – Inverso do *Wetness Index*; INS – Insolação; LIT – Litologia; DCA – Distância aos cursos de água; CRV – Curvatura; DDR – Densidade de drenagem; ACT – Área de Contribuição; USO – Usos dos Solo; DEP – Distância ao epicentro; PRE – Precipitação; TPI – *Topographic Position Index*.

O mapa de altitude representa a cota da superfície topográfica em relação ao nível médio das águas do mar (Figura 36). Sendo uma variável contínua, foi convertida numa variável categórica com 7 classes, com divisão em intervalos de 100 m, à semelhança do efetuado por Marques *et al.*, (2009), Marques (2013) e Marques *et al.*, (2015) em trabalhos no arquipélago. A área de estudo apresenta cotas que variam entre 0 e 680 metros.

A tabela 6 mostra que predominam na área de estudo as classes de altitude inferiores a 500 m, com destaque para as classes entre os 100 e os 200 metros (21,44%) e entre os 200 e os 300 metros (20,69%). Relativamente aos valores de favorabilidade calculados para as diferentes classes de altitude, verifica-se que para os deslizamentos as classes de menor altitude correspondem a maiores valores de favorabilidade. No caso dos desabamentos a classe de menor declive apresenta o valor mais elevado de favorabilidade, seguindo-se a classe entre os 300 e os 400 metros.

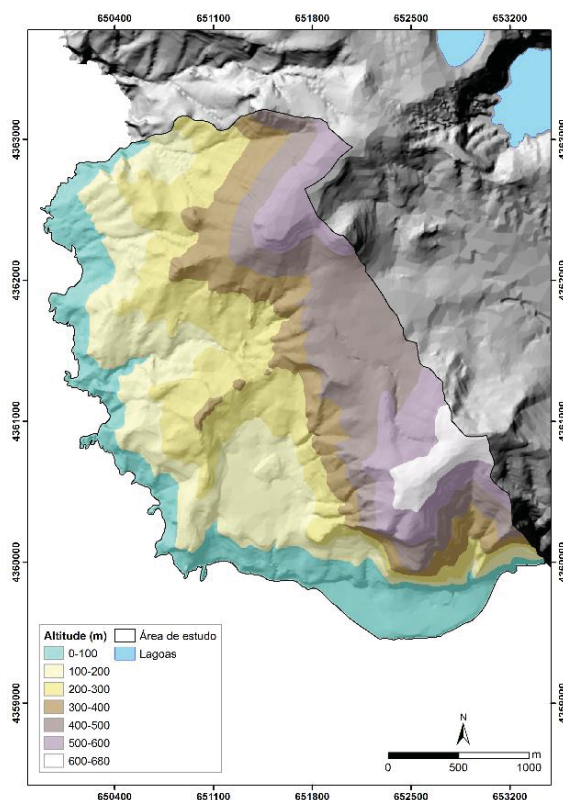


Figura 36 | Mapa hipsométrico para a área de estudo.

Tabela 6 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de altitude e respetivos valores de favorabilidade.

Classes (m)	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
[0-100]	51.149	1.278.725	16,55	0,0744	0,0402
]100-200]	66.239	1.655.975	21,44	0,0207	0,0382
]200-300]	63.937	1.598.425	20,69	0,0216	0,0140
]300-400]	36.294	907.350	11,75	0,0424	0,0138
]400-500]	52.175	1.304.375	16,89	0,0253	0,0021
]500-600]	30.695	767.375	9,93	0,0074	0,0071
]600-680]	8.490	212.250	2,75	0	0,0013
Total	308.979	7.724.475	100		

O mapa de declives expressa as variações de inclinação da superfície topográfica (Figura 37). A transformação de variável contínua em variável categórica resultou na classificação em 13 classes, divididas em intervalos de 5°, tal como efetuado por Marques *et al.*, (2009), Marques (2013) e Marques *et al.*, (2015). Os valores calculados variam entre 0 e 90°.

Na tabela 7 verifica-se que 76,36% da área apresenta declives inferiores a 35°, prevalecendo assim os declives mais baixos. No entanto, 23,64% da área apresenta declives superiores a 35°. Na área de estudo verifica-se uma relação direta entre o aumento do declive e o aumento da favorabilidade para a ocorrência das duas tipologias de movimentos de vertente.

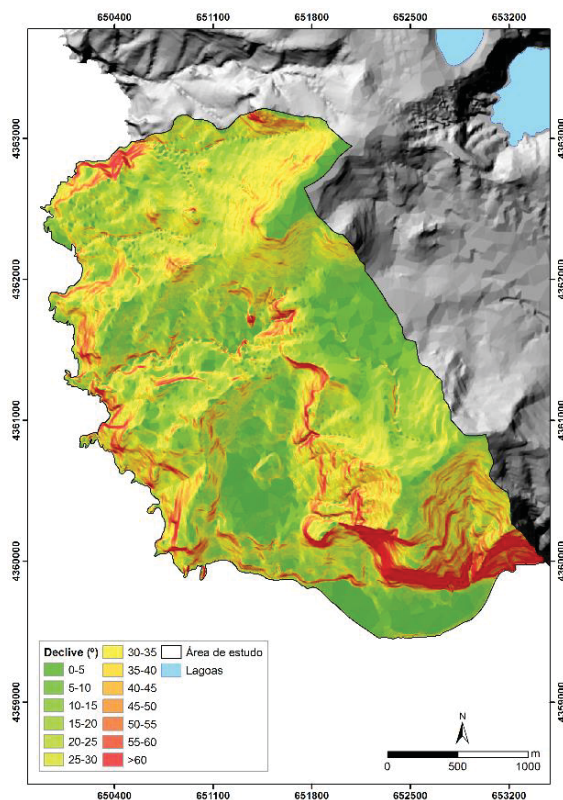


Figura 37 | Mapa de declive para a área de estudo.

Tabela 7 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de declive e respetivos valores de favorabilidade.

Classes (°)	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
[0-5]	23.368	584.200	7,56	0,0002	0,0027
]5-10]	23.412	585.300	7,58	0,0002	0,0020
]10-15]	24.990	624.750	8,09	0,0057	0,0048
]15-20]	37.600	940.000	12,17	0,0034	0,0130
]20-25]	45.424	1.135.600	14,70	0,0047	0,0192
]25-30]	43.826	1.095.650	14,18	0,0106	0,0244
]30-35]	37.308	932.700	12,07	0,0179	0,0296
]35-40]	27.061	676.525	8,76	0,0352	0,0359
]40-45]	16.378	409.450	5,30	0,0580	0,0408
]45-50]	9.642	241.050	3,12	0,0884	0,0476
]50-55]	6.510	162.750	2,11	0,1380	0,0346
]55-60]	4.353	108.825	1,41	0,1519	0,0296
]60-90]	9.107	227.675	2,95	0,3354	0,0120
Total	308979	7724475	100		

O mapa de exposição representa a orientação da projeção horizontal do vetor normal à superfície de maior inclinação de uma unidade de terreno (Figura 38). Os valores obtidos variam entre 0° e 360°. A divisão adotada considera 9 classes, em que 8 representam a variação das orientações, em setores de 45° de abertura angular tendo como bissetrizes os pontos cardiais e colaterais. Para as unidades matriciais em que o declive é 0° não é possível determinar a exposição e como tal foi atribuído o código -1.

Assim, é possível verificar através da análise da Tabela 8 que as vertentes expostas a sudoeste (21,93%), a oeste (20,87%) e a sul (18,50%) dominam na área de estudo, e que 1,71% das vertentes não apresentam uma direção de exposição definida, registando um declive igual a 0°. Relativamente à favorabilidade em cada uma das classes de exposição pode-se destacar que as vertentes expostas a sul e sudoeste são aquelas que apresentam maior propensão para a existência de desabamentos e deslizamentos.

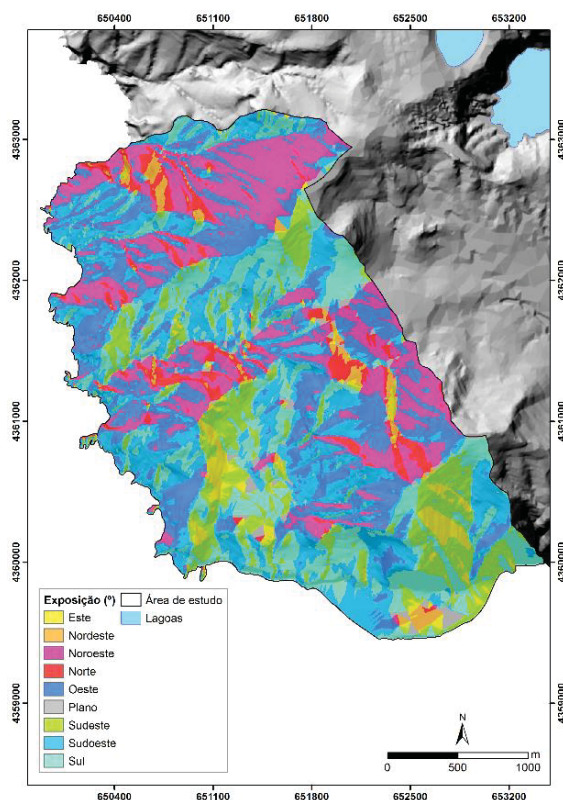


Figura 38 | Mapa de exposição para a área de estudo.

Tabela 8 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de exposição e respetivos valores de favorabilidade.

Classes (°)	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
Este	9.052	226.300	2,93	0,0012	0,0086
Noroeste	52.039	1.300.975	16,84	0,0041	0,0135
Nordeste	5.794	144.850	1,88	0,0079	0,0100
Norte	15.084	377.100	4,88	0,0026	0,0316
Oeste	64.477	1.611.925	20,87	0,0268	0,0187
Plano	5.290	132.250	1,71	0	0,0021
Sudoeste	32.338	808.450	10,47	0,0173	0,0191
Sudoeste	67.751	1.693.775	21,93	0,0582	0,0253
Sul	57.154	1.428.850	18,50	0,0543	0,0259
Total	308979	7724475	100		

O perfil das vertentes foi estudado de forma diferenciada, através do perfil longitudinal, que expressa a forma de uma unidade de terreno na direção da sua máxima inclinação (Figura 39) e do perfil transversal

que indica a forma de uma unidade de terreno perpendicularmente à direção de máxima inclinação (Figura 40).

Os fatores perfil longitudinal e perfil transversal foram classificados em 6 classes, considerando-se 3 classes principais (côncava, convexa e retilínea), 2 classes extremas (muito convexas e muito côncavas) e uma classe exclusiva para as unidades de terreno planas ($\text{declive}=0^\circ$).

Na área de estudo, para o perfil longitudinal, predominam as classes convexas (35,77%) e côncavas (34,81%) e, de forma idêntica, para o perfil transversal existe um predomínio das classes côncavas (35,98%) e convexas (40,83%) (Tabelas 9 e 10). Relativamente à predisposição para a instabilidade inferida pelo valor da favorabilidade, verifica-se que para o perfil longitudinal, as classes extremas, muito convexo e muito côncavo, apresentam os valores mais elevados de favorabilidade para as duas tipologias. Relativamente aos valores de favorabilidade das classes do perfil transversal, as classes extremas, muito convexo e muito côncavo, apresentam os valores mais elevados de favorabilidade para os desabamentos. No caso dos deslizamentos são as classes côncava e muito côncava que apresentam os valores mais elevados.

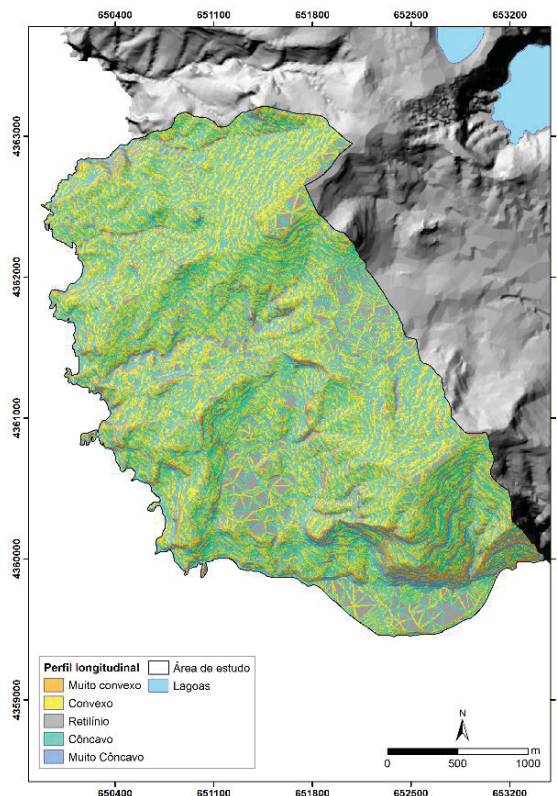


Figura 39 | Mapa do perfil longitudinal para a área de estudo.

Tabela 9 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe do perfil longitudinal e respetivos valores de favorabilidade.

Classes	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
Muito Convexo	29.075	726.875	9,41	0,0894	0,0251
Convexo	110.511	2.762.775	35,77	0,0182	0,0201
Retilíneo	31.729	793.225	10,27	0,0027	0,0058
Côncavo	107.543	2.688.575	34,81	0,0202	0,0210
Muito Côncavo	30.121	753.025	9,75	0,0900	0,0318
Total	308979	7724475	100		

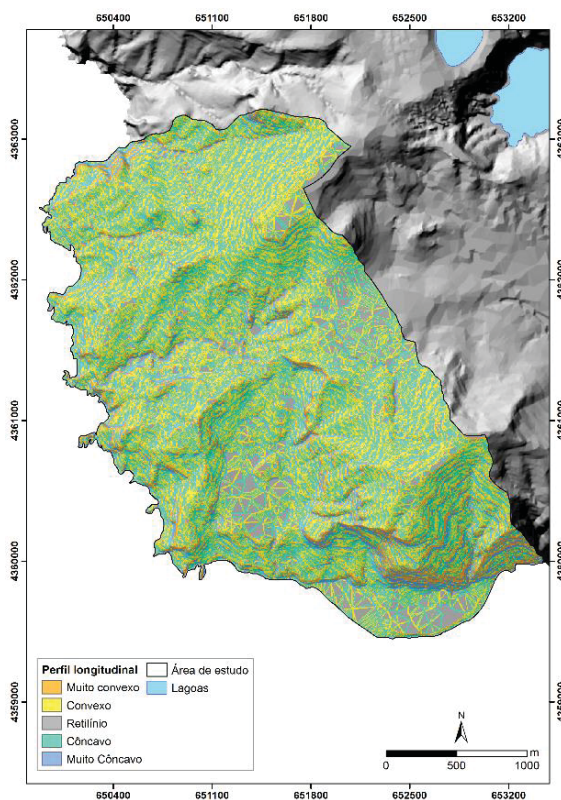


Figura 40 | Mapa do perfil transversal para a área de estudo.

Tabela 10 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe do perfil transversal e respetivos valores de favorabilidade.

Classes	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
Muito Côncavo	18.355	458.875	5,94	0,0658	0,0395
Côncavo	111.176	2.779.400	35,98	0,0301	0,0247
Retilíneo	33.955	848.875	10,99	0,0055	0,0071
Convexo	126.144	3.153.600	40,83	0,0279	0,0181
Muito Convexo	19.349	483.725	6,26	0,0729	0,0175
Total	308979	7724475	100		

A área de contribuição quantifica a área que drena para uma dada unidade de terreno (Figura 41). À semelhança de outros autores (*e.g.* Marques *et al.*, 2009; Garcia, 2012 e Marques, 2013), optou-se pela utilização do algoritmo D^∞ para a determinação das direções de fluxo, cujo resultado serviu de base ao cálculo da área de contribuição.

Sendo uma variável contínua, da divisão adotada resultaram 10 classes, nas quais a amplitude de cada classe corresponde ao dobro da amplitude da classe que a antecede (Tabela 11), uma vez que a distribuição das frequências das UT's ser muito assimétrica, sendo muito elevada para as áreas de contribuição pequenas e muito baixa para as áreas de contribuição mais elevadas.

Na área de estudo dominam as classes de área de contribuição entre 400 m² e 800 m² (24,49%) e 800 e 1600 m² (21,70%) (Tabela 11). No que respeita à favorabilidade verifica-se, para as duas tipologias, que as classes caracterizadas por valores de área de contribuição mais pequenas, bem como as duas classes com maior área de contribuição nos desabamentos, apresentam valores baixos de favorabilidade. As restantes classes consideradas, entre os 400 m² e os 12.800 m² de área de contribuição, não apresentam grandes diferenças, destacando-se apenas as classes [1600-3200] e [6400-12800], por apresentarem valores de favorabilidade um pouco superiores às restantes para os desabamentos e nos deslizamentos, respetivamente.

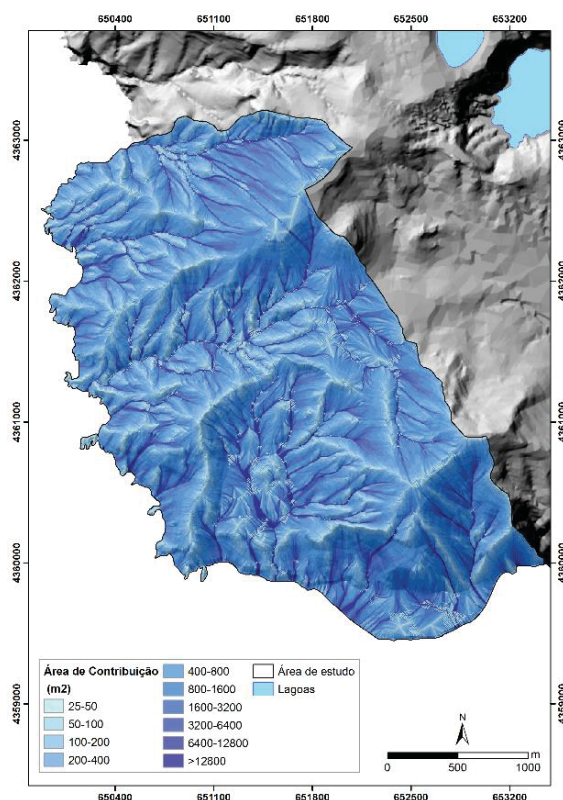


Figura 41 | Mapa da área de contribuição para a área de estudo.

Tabela 11 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe da área de contribuição e respetivos valores de favorabilidade.

Classes (m ²)	Nr. de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
[25-50]	8038	200950	2,60	0,0066	0,0045
]50-100]	9403	235075	3,04	0,0137	0,0037
]100-200]	28416	710400	9,20	0,0168	0,0092
]200-400]	56792	1419800	18,38	0,0209	0,0172
]400-800]	75678	1891950	24,49	0,0305	0,0240
]800-1600]	67049	1676225	21,70	0,0478	0,0217
]1600-3200]	33025	825625	10,69	0,0494	0,0243
]3200-6400]	12585	314625	4,07	0,0324	0,0276
]6400-12800]	6232	155800	2,02	0,0148	0,0442
>12800	11761	294025	3,81	0,0169	0,0291
Total	308979	7724475	100		

O inverso do *wetness index* é um índice topográfico que funciona como um indicador da quantidade de água potencial no terreno e que relaciona a área de contribuição de uma unidade de terreno matricial com o seu declive (Figura 42). Este fator foi classificado em 10 classes com intervalos baseados no aumento progressivo logarítmico de base 10 entre classes, considerando os quartis para cada incremento logarítmico, uma vez que a frequência das unidades de terreno é elevada em valores próximos de 0 e reduzida para valores mais elevados.

Pela análise da tabela 12 verifica-se que a classe $]0,025-0,050]$ é dominante na área de estudo (23,04%). Nesta classe incluem-se as UT's que correspondem, no geral, à parte superior de taludes de cursos de água e zonas envolventes. Relativamente aos valores de favorabilidade, verifica-se que a primeira classe apresenta valores de favorabilidade muito baixos. No caso dos desabamentos as classes mais elevadas têm valores de favorabilidade mais elevados, associados ao maior declive. As classes consideradas apresentam valores de favorabilidade muito semelhantes para os deslizamentos, destacando-se a classe $]0,010-0,025]$ por apresentar um valor de favorabilidade ligeiramente superior.

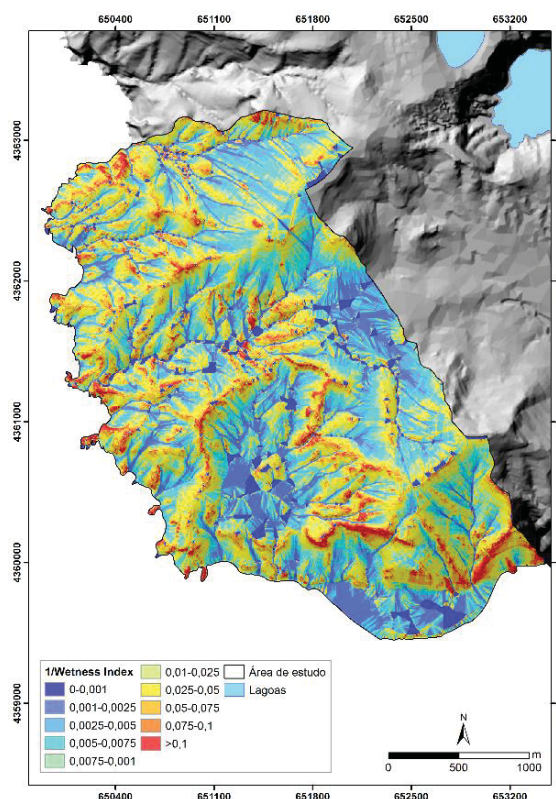


Figura 42 | Mapa do inverso do wetness index para a área de estudo.

Tabela 12 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe do inverso do *wetness index* e respetivos valores de favorabilidade.

Classes	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
[0-0,001]	9.929	248.225	3,21	0,0003	0,0079
]0,001-0,0025]	34.027	850.675	11,01	0,0073	0,0226
]0,0025-0,005]	33.741	843.525	10,92	0,0174	0,0185
]0,005-0,0075]	48.960	1.224.000	15,85	0,0192	0,0192
]0,0075-0,010]	35.784	894.600	11,58	0,0257	0,0211
]0,010-0,025]	26.110	652.750	8,45	0,0338	0,0253
]0,025-0,050]	71.177	1.779.425	23,04	0,0411	0,0238
]0,050-0,075]	30.269	756.725	9,80	0,0536	0,0191
]0,075-0,100]	9.438	235.950	3,05	0,0618	0,0152
>0,1	9.544	238.600	3,09	0,0993	0,0106
Total	308979	7724475	100		

O mapa de insolação traduz a radiação total potencial anual em cada unidade de terreno (Figura 43). A insolação foi dividida em 12 classes. A tabela 13 sintetiza os resultados da distribuição por classes de insolação, destacando-se para a área de estudo as classes com valores compreendidos entre 1.200 e 1.300 kW/m²/ano (30,0%) e entre 1.300 e 1.400 kW/m²/ano (20,77%). Relativamente à favorabilidade das classes de insolação para a ocorrência de ambas as tipologias de movimentos de vertente, constata-se que não existe uma relação clara entre o aumento ou a diminuição da insolação e a distribuição espacial dos movimentos de vertente na área de estudo.

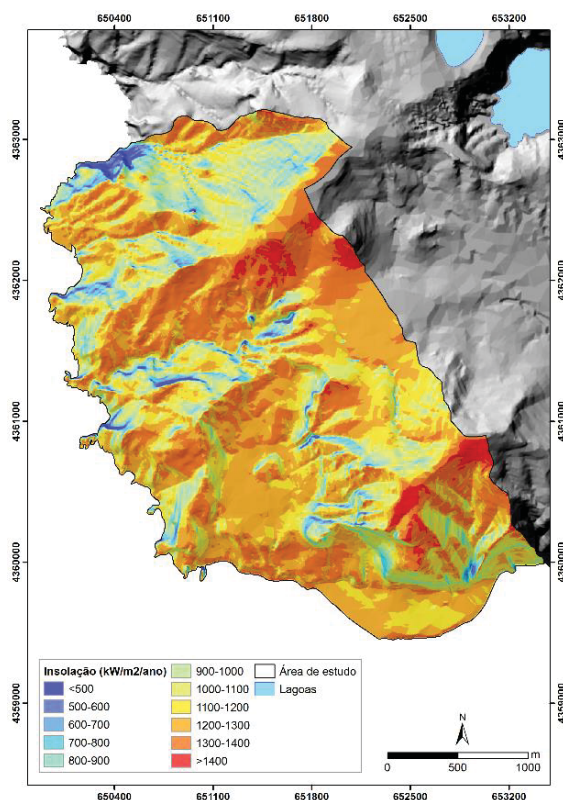


Figura 43 | Mapa de insolação para a área de estudo.

Tabela 13 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de insolação e respetivos valores de favorabilidade.

Classes (kW/m ² /ano)	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
≤500	2.125	53.125	0,69	0,0446	0,0079
]500-600]	2.002	50.050	0,65	0,0198	0,0226
]600-700]	3.302	82.550	1,07	0,0168	0,0185
]700-800]	6.010	150.250	1,95	0,0414	0,0192
]800-900]	13.886	347.150	4,49	0,0440	0,0211
]900-1000]	27.014	675.350	8,74	0,0615	0,0253
]1.000-1.100]	35.857	896.425	11,60	0,0650	0,0238
]1.100-1.200]	54.224	1.355.600	17,55	0,0331	0,0191
]1.200-1300]	92.700	2.317.500	30,00	0,0208	0,0152
]1.300-1.400]	64.168	1.604.200	20,77	0,0134	0,0106
>1.400	7.691	192.275	2,49	0,0052	0,0079
Total	308979	7724475	100		

A distância aos cursos de água corresponde à distância entre um qualquer curso de água e uma determinada unidade de terreno (Figura 44). Esta variável foi dividida em 7 classes que correspondem a distâncias pré-definidas aos cursos de água (Tabela 14).

Pelos resultados obtidos, verifica-se que as classes que consideram distâncias entre os cursos de água e as UT's menores do que 50 metros representam 45,88% da área de estudo (Tabela 14). A existência de um elevado número de cursos de água limita o número de UT's muito afastadas de cursos de água. Face aos valores de favorabilidade, verifica-se para os desabamentos que existe uma relação direta entre o aumento da distância aos cursos de água e o aumento dos valores de favorabilidade calculados. No caso dos deslizamentos, não existe uma relação causal clara entre a variação da distância aos cursos de água e a distribuição espacial de deslizamentos na área de estudo.

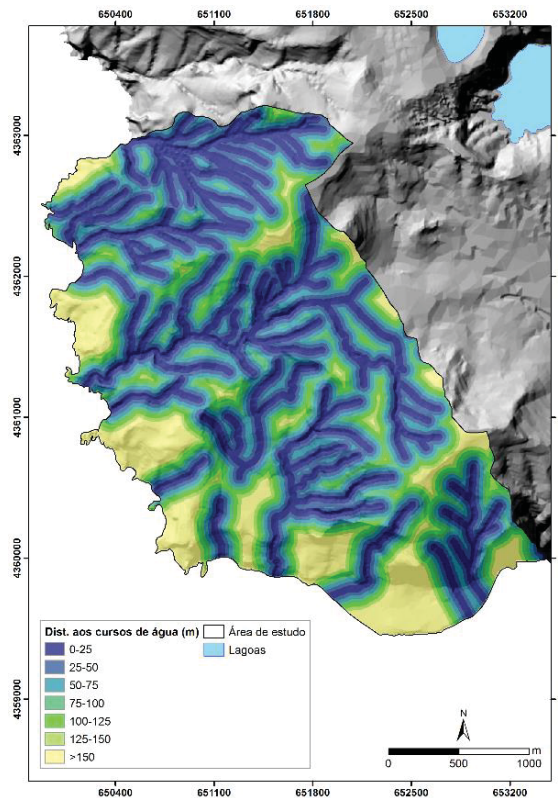


Figura 44 | Mapa da distância aos cursos de água para a área de estudo.

Tabela 14 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe da distância aos cursos de água e respetivos valores de favorabilidade.

Classes (m)	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
[0-25]	75.360	1.884.000	24,39	0,0113	0,0252
]25-50]	66.415	1.660.375	21,49	0,0143	0,0174
]50-75]	50.419	1.260.475	16,32	0,0209	0,0166
]75-100]	35.426	885.650	11,47	0,0331	0,0221
]100-125]	24.812	620.300	8,03	0,0477	0,0158
]125-150]	16.530	413.250	5,35	0,0675	0,0110
>150	40.017	1.000.425	12,95	0,0822	0,0274
Total	308979	7724475	100		

O mapa geológico foi elaborado com base na Carta Geológica da ilha das Flores (Azevedo, 1999), à escala 1:25.000, onde consta um levantamento geológico assente nos depósitos vulcânicos superficiais (Figura 45). Para a definição deste fator de predisposição, as 13 unidades geológicas da carta original, presentes na área de estudo, foram agrupadas em 10 classes tendo em conta as características litológicas e a respetiva idade de formação.

A área de estudo é caracterizada maioritariamente pela presença de depósitos basálticos (*s.l.*) com idades entre os 1,8 Ma e os 0,22 Ma. Os depósitos basálticos (*s.l.*) e vulcanoclásticos, mais antigos, com idades superiores a 2,0 Ma, cobrem 6,31% da área de estudo. Os depósitos mais recentes, com idades inferiores a 3.000 anos, cobrem 23,09% da área e correspondem a depósitos de vertente, freatomagmáticos e escoriáceos (Tabela 15). Relativamente aos valores de favorabilidade, verifica-se que há uma clara predisposição para a ocorrência de desabamentos nas classes compostas por basaltos (*s.l.*) e traquitos, com idades compreendidas entre os 0,40 Ma e os 0,67 Ma BP, e basaltos com idade superior a 2,0 Ma BP. No caso dos deslizamentos os valores mais elevados de favorabilidade estão associados a classes compostas por basaltos (*s.l.*) com idades superiores a 1,5 Ma BP.

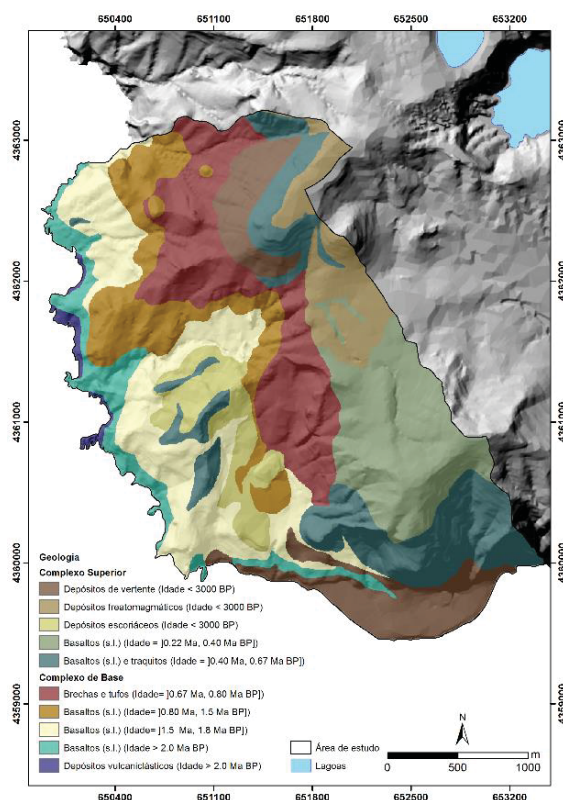


Figura 45 | Mapa geológico para a área de estudo (Azevedo, 1999).

Tabela 15 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de geologia e respetivos valores de favorabilidade.

Classes	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
Depósitos de vertente (Idade < 3.000 BP)	33.017	825.425	10,69	0,0476	0,0109
Depósitos freatomagmáticos (Idade < 3.000 BP)	20.236	505.900	6,55	0	0
Depósitos escoriáceos (Idade < 3.000 BP)	18.100	452.500	5,86	0	0,0121
Basaltos (s.l.) (Idade =]0,22 Ma, 0,40 Ma BP])	42.211	1.055.275	13,66	0,0067	0,0076
Basaltos (s.l.) e traquitos (Idade =]0,40 Ma; 0,67 Ma BP])	47.574	1.189.350	15,40	0,1035	0,0014
Brechas e tufos (Idade=]0,67 Ma; 0,80 Ma BP])	48.537	1.213.425	15,71	0	0,0097
Basaltos (s.l.) (Idade=]0,80 Ma; 1,5 Ma BP])	32.155	803.875	10,41	0,0063	0,0323
Basaltos (s.l.) (Idade=]1,5 Ma; 1,8 Ma BP])	47.664	1.191.600	15,43	0,0114	0,0613
Basaltos (s.l.) (Idade > 2,0 Ma BP)	17.051	426.275	5,52	0,1006	0,0502
Depósitos vulcanoclásticos (Idade > 2,0 Ma BP)	2.434	60.850	0,79	0,0902	0,0098
Total	308979	7724475	100		

A densidade de drenagem corresponde à razão entre o comprimento dos cursos de água e uma determinada área (Figura 46). Sendo uma variável contínua, foi reclassificada para as classes listadas na tabela 16 (e.g. Marques *et al.*, 2015).

Pela análise da tabela 16 é possível concluir que são as classes com densidade de drenagem menores que 10 km/km² predominam na área de estudo, correspondendo a 92,85% da totalidade da área. Relativamente aos valores de favorabilidade calculados para as diferentes classes de densidade de drenagem verifica-se para os desabamentos que a classe [10-15] evidencia o valor mais elevado de favorabilidade, seguindo-se a classe com menor valor de densidade de drenagem. No caso dos deslizamentos verifica-se que as classes com maior densidade de drenagem apresentam valores mais elevados de favorabilidade.

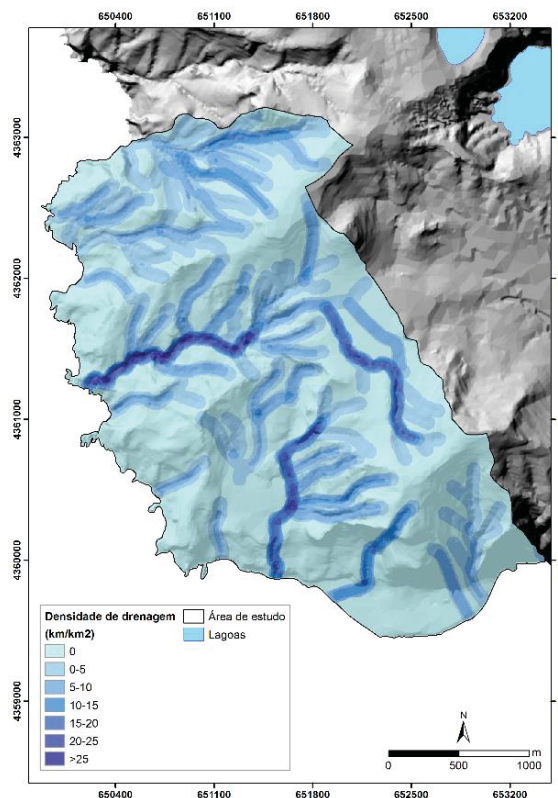


Figura 46 | Mapa da densidade de drenagem para a área de estudo.

Tabela 16 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe da densidade de drenagem e respetivos valores de favorabilidade.

Classes (km/km ²)	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
{0}	167.157	4.178.925	54,10	0,0470	0,0197
]0-5]	74.951	1.873.775	24,26	0,0077	0,0162
]5-10]	44.762	1.119.050	14,49	0,0121	0,0260
]10-15]	10.891	272.275	3,52	0,0566	0,0207
]15-20]	6.685	167.125	2,16	0,0075	0,0394
]20-25]	3.404	85.100	1,10	0,0012	0,0487
>25	1.129	28.225	0,37	0,0097	0,0176
Total	308979	7724475	100		

O mapa de uso do solo utilizado foi adaptado da Carta de Ocupação do Solo da Região Autónoma dos Açores (SRAM, 2007), publicada na escala 1:30.000. Pelo facto de a carta conter unidades matriciais de 30x30 m, foi necessário corrigir a informação ao longo da linha de costa para manter a coerência com os restantes fatores de predisposição (Figura 47). Foram consideradas 6 classes, tal como consta originalmente na carta de ocupação do solo para a área de estudo.

A análise da tabela 17 permite verificar que classe predominante de usos do solo na área de estudo são as pastagens, que ocupam 47,17% da totalidade da área, utilizadas maioritariamente para criação de gado e que estão situadas em zonas de baixo declive. A área de estudo é igualmente ocupada por zonas florestais que representam 26,52% da totalidade da área. As UT's desta classe estão localizadas essencialmente em taludes de cursos de água muito encaixados e em zonas declivosas que são aproveitadas para o plantio de árvores. As áreas descobertas constituem 15,32% da área total e, no geral, localizam-se nas arribas e em locais extremamente escarpados, nas quais a erosão e a elevada reincidência de movimentos de vertente não permite o desenvolvimento de coberto vegetal. A classe vegetação natural, que constitui 8,00% da área, encontra-se restrita às zonas de maior altitude, sendo composta essencialmente por vegetação com características arbustivas. As áreas agrícolas representam 4,02% da área total e são essencialmente compostas por terrenos de cultivo. A área urbana representa cerca de 0,97% da área total e nela estão englobados os principais centros populacionais da área de estudo. Relativamente aos valores de favorabilidade obtidos para as diferentes classes de usos do solo consideradas, verifica-se para as duas tipologias que a classe de áreas descobertas apresenta valores mais elevados de favorabilidade.

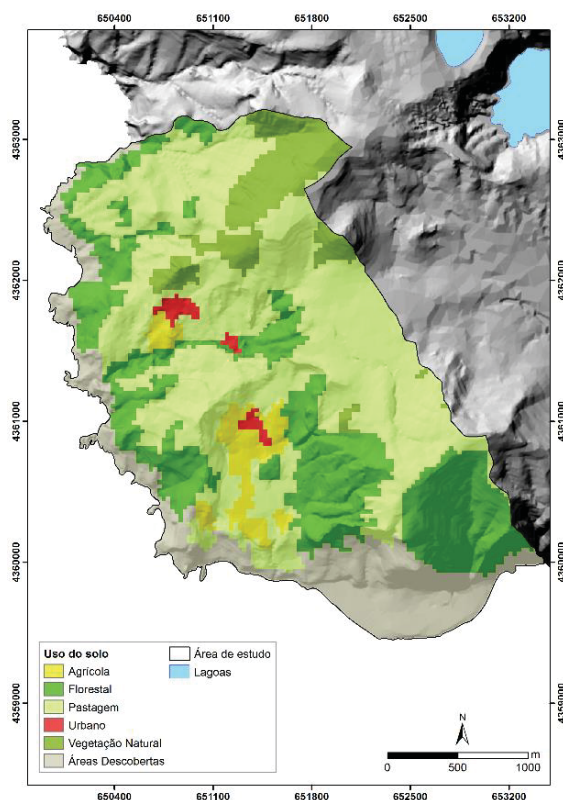


Figura 47 | Mapa de usos do solo para a área de estudo.

Tabela 17 | Frequências absolutas e relativas referentes a cada classe de usos do solo e respetivos valores de favorabilidade.

Classes	N.º de pixéis	Área (m ²)	Área (%)	F_i - DSB	F_i - DSL
Agrícola	12.420	310.500	4,02	0	0,019
Florestal	81.944	2.048.600	26,52	0,0102	0,033
Pastagem	139.578	3.489.450	45,17	0,0056	0,015
Urbano	2.988	74.700	0,97	0	0,001
Vegetação Natural	24.705	617.625	8,00	0	0
Áreas Descobertas	47.344	1.183.600	15,32	0,1599	0,027
Total	308979	7724475	100		

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. Análise sensitiva dos fatores de predisposição

Para a hierarquização da importância dos fatores de predisposição, quanto à sua capacidade de discriminar o território relativamente à sua propensão para a ocorrência de movimentos de vertente, foi utilizado o valor da área abaixo da curva das curvas de sucesso de cada fator de predisposição para cada tipologia de movimentos de vertente, utilizando a favorabilidade para a ordenação da área de estudo por ordem decrescente de suscetibilidade. Na figura 48 apresentam-se as curvas de sucesso obtidas para cada fator de predisposição para cada tipologia - desabamentos (Figura 48a) e deslizamentos (Figura 48b).

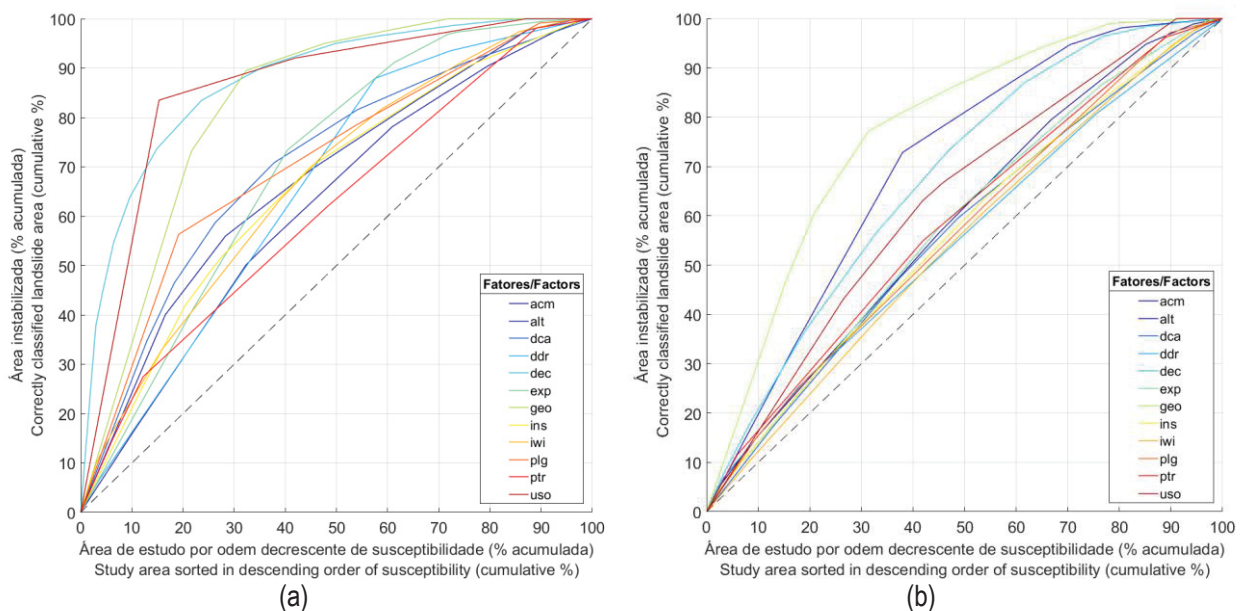


Figura 48 | Curvas de sucesso para cada fator de predisposição para: (a) para desabamentos e (b) para deslizamentos.

Os valores das AAC's apresentados na tabela 18 permitem definir quantitativamente a hierarquia dos fatores de predisposição na discriminação para cada uma das tipologias de movimento de vertente.

Tabela 18 | Valores das áreas abaixo das curvas de sucesso e respetivas hierarquizações de cada um dos fatores de predisposição para cada tipologia.

Fatores	Desabamentos		Deslizamentos	
	Hierarquia	AAC	Hierarquia	AAC
Altimetria	7	0,672	2	0,703**
Declive	1	0,875**	3	0,678**
Exposição	6	0,700	7	0,581
Insolação	9	0,661	9	0,566
Perfil longitudinal	5	0,702	8	0,568
Perfil transversal	12	0,612*	6	0,587
Área de contribuição	11	0,618*	5	0,588
Inverso do <i>wetness index</i>	8	0,669	12	0,548*
Distância aos cursos de água	4	0,704	10	0,565*
Densidade de drenagem	10	0,658*	11	0,552*
Geologia	3	0,823**	1	0,772**
Usos do solo	2	0,855**	4	0,631

* fatores de predisposição classificados nas três posições hierárquicas inferiores;

** fatores de predisposição classificados nas três posições hierárquicas superiores.

A análise dos resultados da tabela 18 permite concluir que os fatores declive e geologia tem uma destacada importância na discriminação espacial dos locais onde ocorrem as duas tipologias de movimento de vertente. O declive ocupa a primeira posição hierárquica nos desabamentos e a terceira nos deslizamentos, e a geologia a terceira posição hierárquica nos desabamentos e a primeira nos deslizamentos. Os fatores uso do solo e altimetria ocupam a segunda posição hierárquica nos desabamentos e nos deslizamentos, respetivamente. O fator de predisposição densidade de drenagem ocupa as posições hierárquicas mais baixas nas duas tipologias, tal como a área de contribuição e o perfil transversal nos desabamentos e a distância aos cursos de água e o inverso do *wetness index* nos deslizamentos, revelando a sua baixa capacidade de discriminar áreas onde ocorrem movimentos de vertente.

Os resultados obtidos comprovam que a influência dos fatores de predisposição considerados para a análise de suscetibilidade, são muito diferentes dependendo da tipologia dos movimentos de vertente, confirmando, concomitantemente, a necessidade de discriminar os movimentos de vertente por tipologia para efetuar corretamente a análise de suscetibilidade (e.g. Garcia, 2012; Silva *et al.*, 2017 e 2018).

4.3.2. Ajuste dos modelos de suscetibilidade aos dados de entrada

O processo de hierarquização da importância de cada fator de predisposição não permite avaliar o verdadeiro contributo de cada variável no modelo final de suscetibilidade quando se utiliza mais do que um fator. Neste âmbito, esta secção discute questões relevantes relacionadas com o resultado final da análise da suscetibilidade, abordando a influência de cada um dos fatores nos modelos de suscetibilidade, a influência do número de variáveis considerados e a melhor combinação de variáveis para a área de estudo.

Uma vez que a ocorrência de diferentes tipos de movimentos de vertente pode ser condicionada de modo distinto, consideraram-se separadamente as duas tipologias: desabamentos e deslizamentos. A utilização de 12 fatores de predisposição permite, através de uma análise combinatória pelo método da combinação simples, gerar 4.095 combinações de fatores de predisposição diferentes entre si (Tabela 19).

Tabela 19 | Número de modelos de suscetibilidade obtidos com diferentes números de fatores de predisposição.

Número de fatores de predisposição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Número de modelos	12	66	220	495	792	924	792	495	220	66	12	1	4.095

As curvas de sucesso resultantes dos 8.190 modelos de suscetibilidade gerados para as tipologias de movimentos de vertente em estudo são apresentadas na Figura 49. As curvas dos modelos representadas por linhas vermelhas correspondem às melhores combinações de fatores predisposição, com uma área abaixo da curva de 0,95 e 0,84 para desabamentos (Figura 49a) e deslizamentos (Figura 49b), respetivamente.

Para as duas tipologias de movimentos de vertente, os resultados mostram uma variação importante do ajuste dos modelos aos dados de entrada, como consequência da variação do número de fatores de predisposição que os constituem. No caso dos desabamentos, verifica-se que o ajuste dos modelos aos dados de entrada é melhor relativamente aos deslizamentos, dadas as condições de terreno mais restritas em que ocorrem, mais circunscritas a áreas específicas da área de estudo, sendo por isso mais facilmente identificáveis.

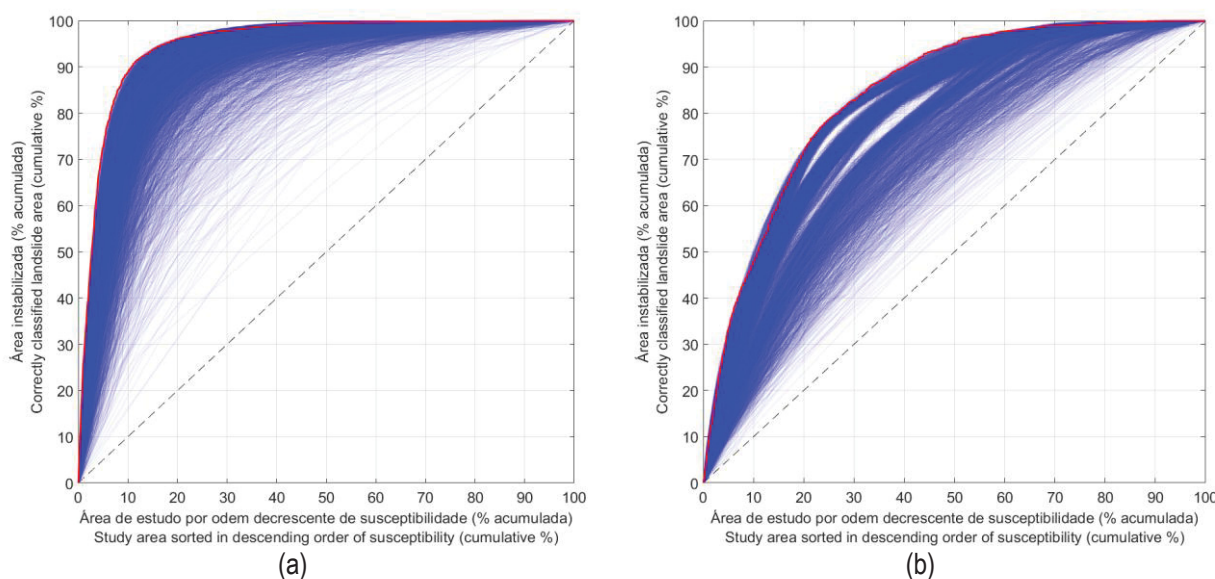


Figura 49 | Curvas de Sucesso resultantes dos 4.095 modelos de susceptibilidade gerados: (a) para desabamentos e (b) para deslizamentos.

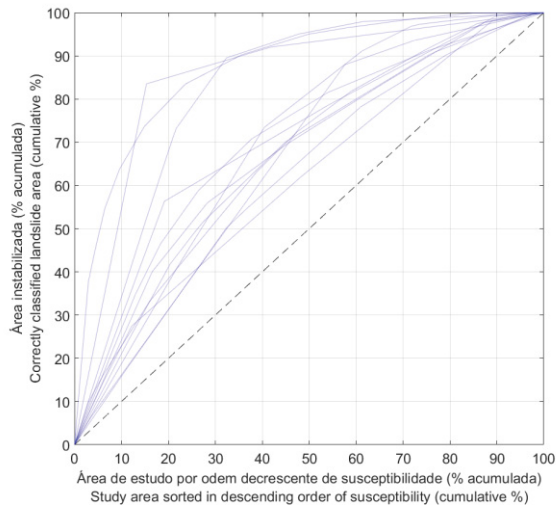
Uma análise com maior pormenor pode ser feita com base nas figuras 50 e 51, que mostram as curvas de sucesso dos modelos de acordo com o número de fatores de predisposição que os constituem.

No caso dos desabamentos (Figura 50), pela análise do comportamento das curvas, verifica-se que a adição de fatores de predisposição nos modelos de susceptibilidade aumenta a sua qualidade, numa relação quase linear. É notório o elevado ajuste dos modelos aos dados de entrada, mesmo que esteja presente um número reduzido de fatores de predisposição, observando-se um comportamento muito semelhante das curvas dos modelos com sete, oito, nove e dez fatores de predisposição.

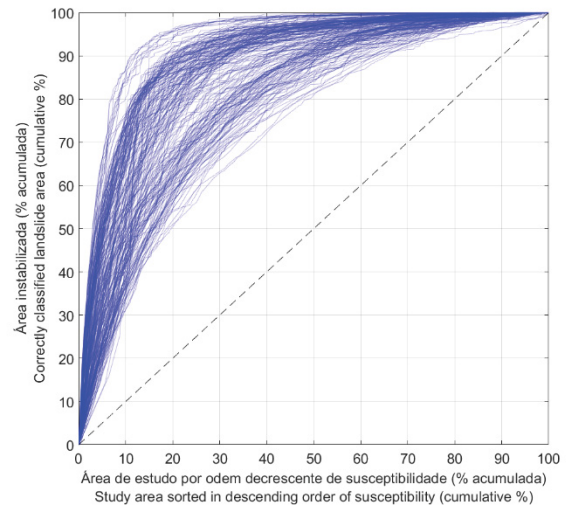
De igual modo, para o caso dos deslizamentos (Figura 51), verifica-se que a adição de fatores de predisposição nos modelos de susceptibilidade aumenta a sua qualidade, embora com menor poder de ajuste dos modelos aos dados de entrada.

Para ambas as tipologias, os ganhos no ajuste dos modelos de susceptibilidade ocorrem essencialmente na área classificada como mais suscetível a movimentos de vertente, ou seja, as áreas com menos susceptibilidade são rapidamente identificadas, havendo uma melhoria da qualidade do modelo relativamente às áreas consideradas como mais suscetíveis para a ocorrência de movimentos de vertente, com a inclusão dos restantes fatores de predisposição.

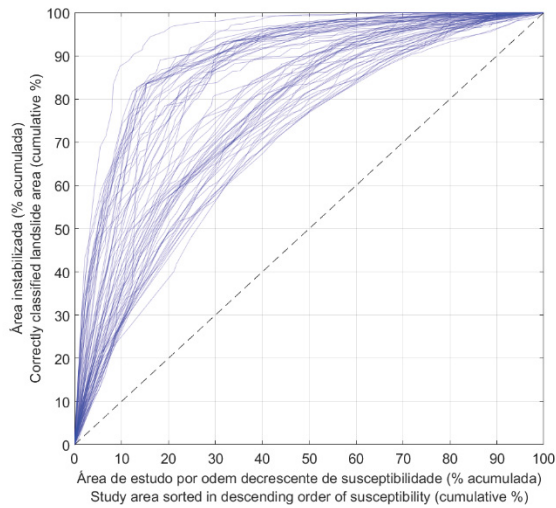
4. Aplicação do Protótipo Computacional ALSA-Tools: Um Caso de Estudo na Freguesia do Lajedo (Ilha das Flores, Açores)



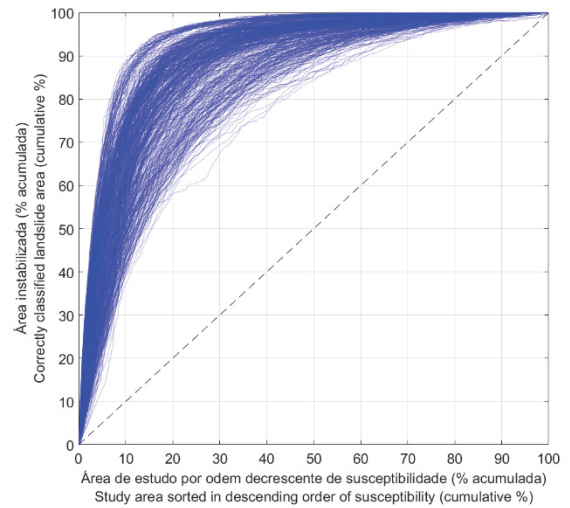
(a)



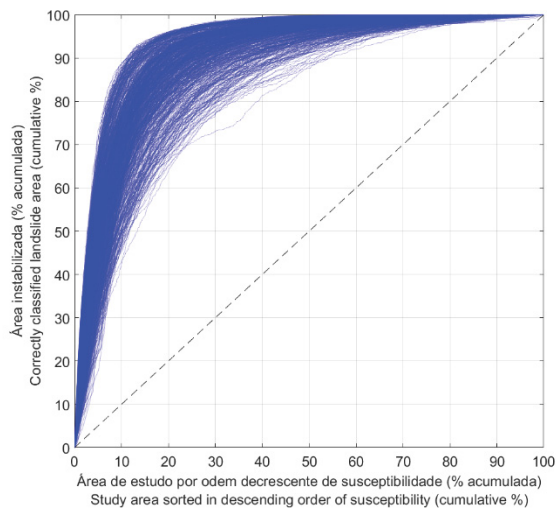
(b)



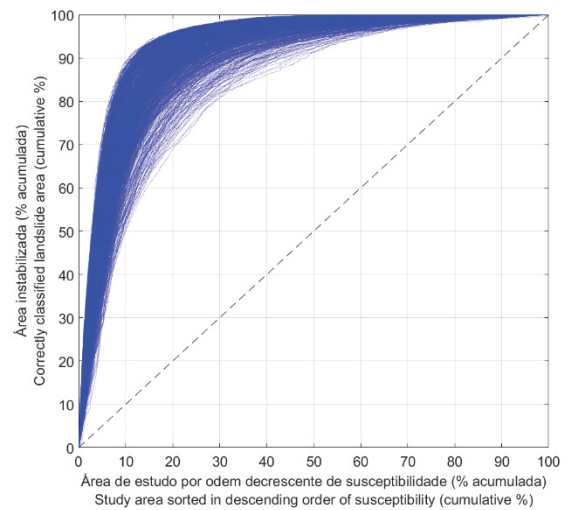
(c)



(d)



(e)



(f)

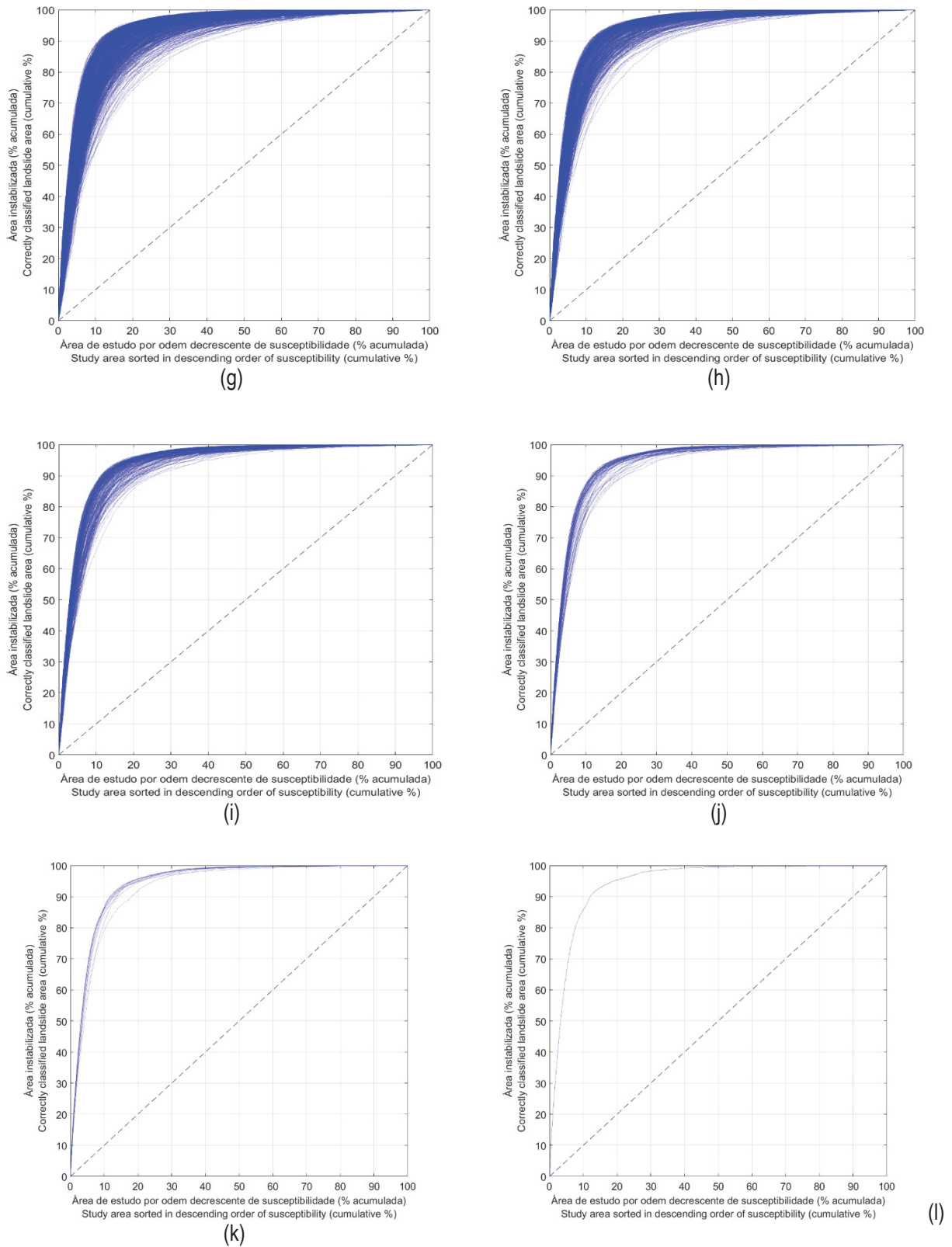
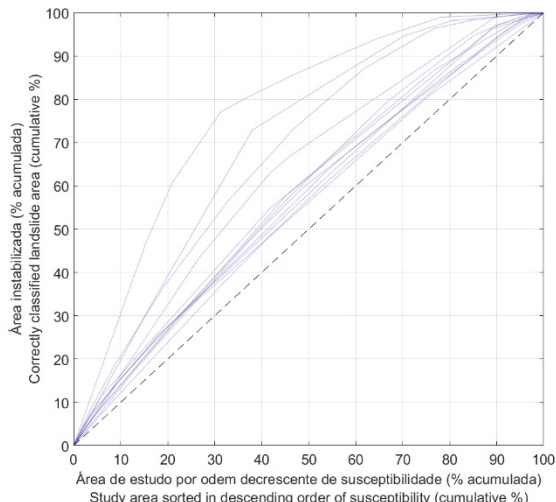
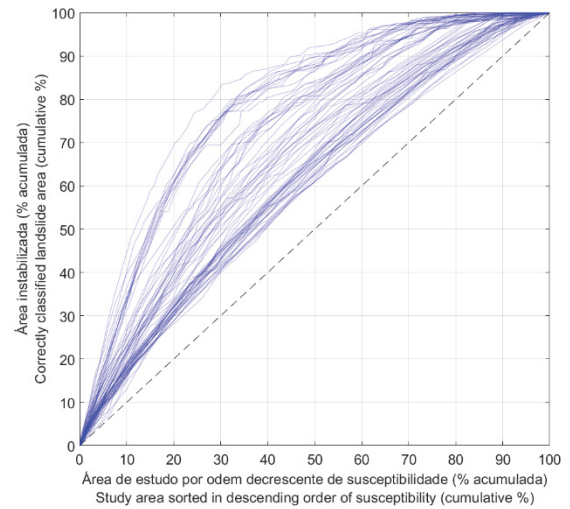


Figura 50 | SRC's dos modelos para desabamentos considerando: (a) 1 fator; (b) 2 fatores; (c) 3 fatores; (d) 4 fatores; (e) 5 fatores; (f) 6 fatores; (g) 7 fatores; (h) 8 fatores; (i) 9 fatores; (j) 10 fatores; (k) 11 fatores e (l) 12 fatores.

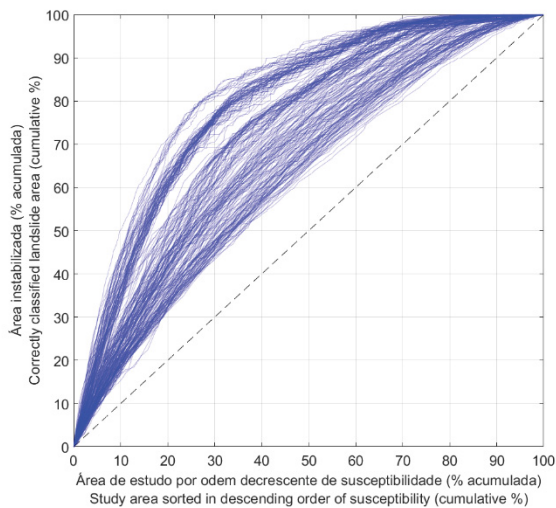
4. Aplicação do Protótipo Computacional ALSA-Tools: Um Caso de Estudo na Freguesia do Lajedo (Ilha das Flores, Açores)



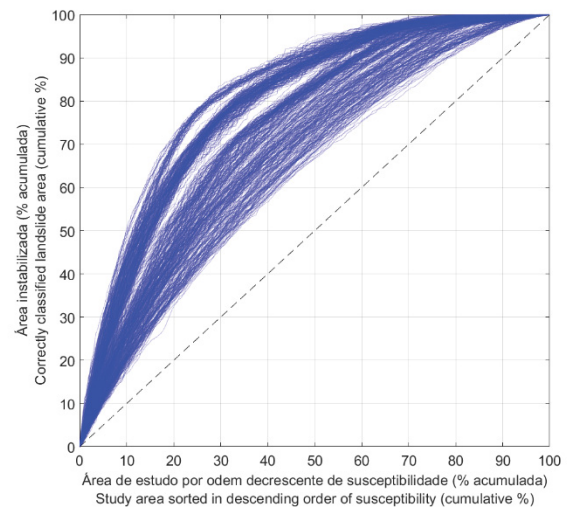
(a)



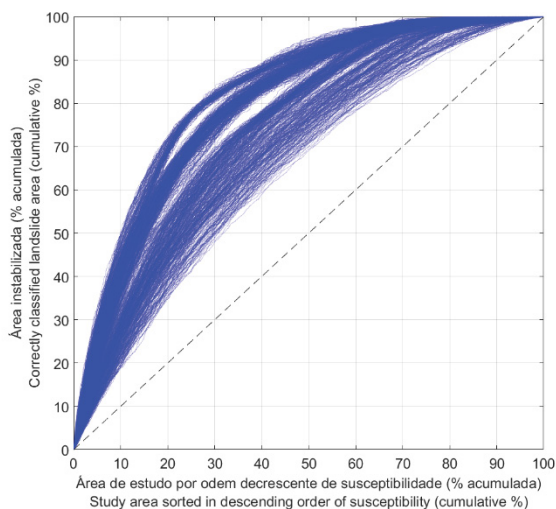
(b)



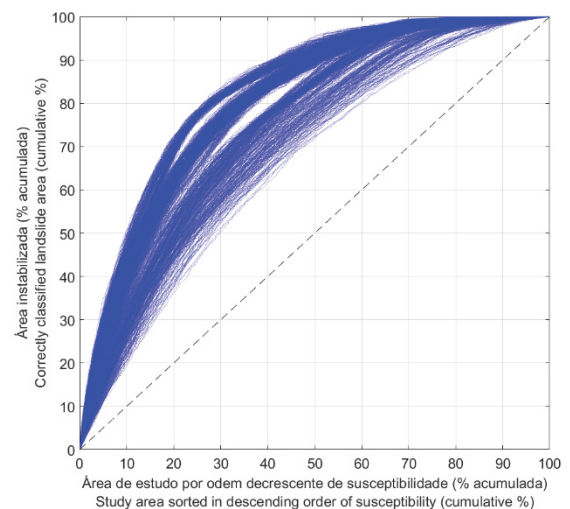
(c)



(d)



(e)



(f)

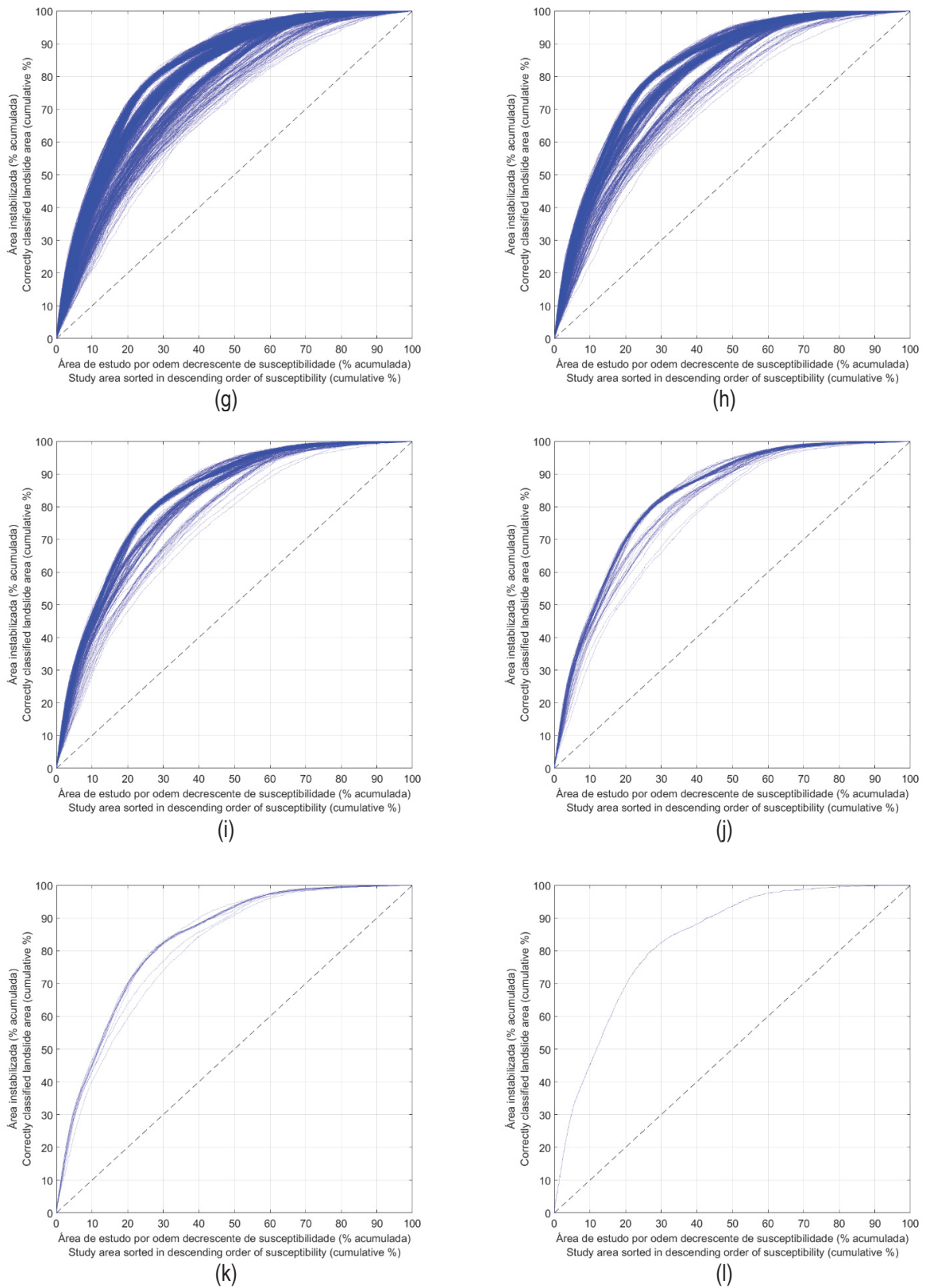
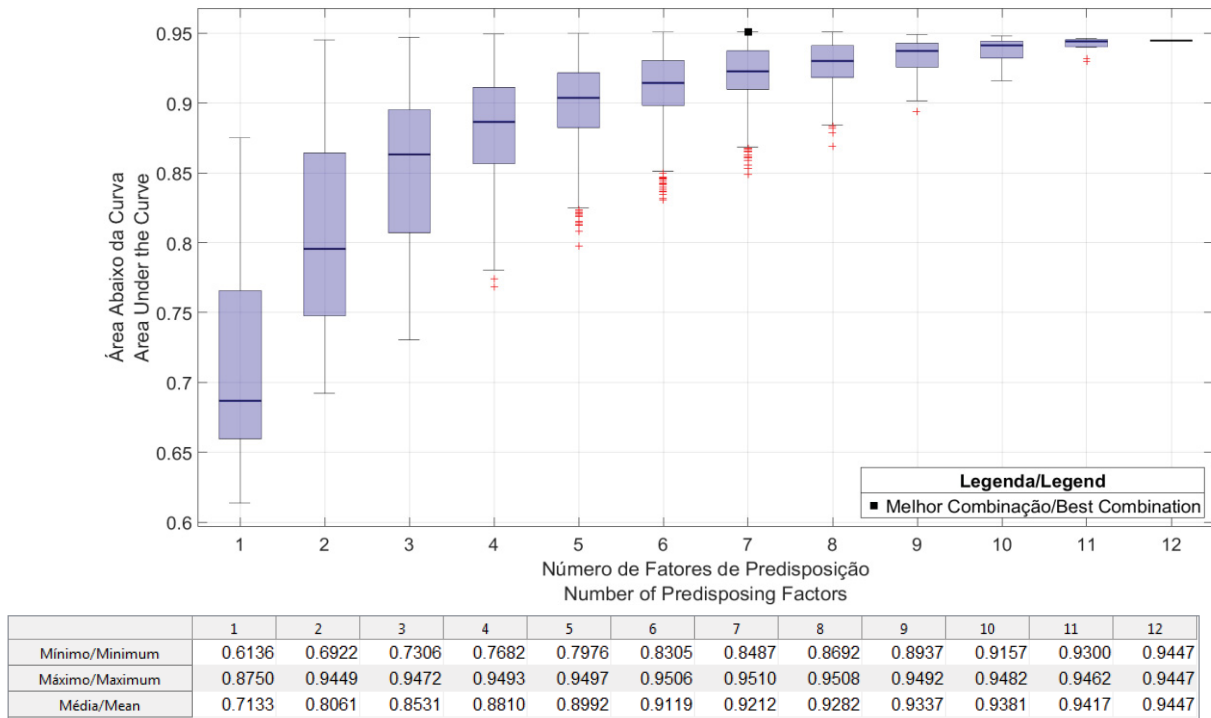


Figura 51 | SRC's dos modelos para deslizamentos considerando: (a) 1 fator; (b) 2 fatores; (c) 3 fatores; (d) 4 fatores; (e) 5 fatores; (f) 6 fatores; (g) 7 fatores; (h) 8 fatores; (i) 9 fatores; (j) 10 fatores; (k) 11 fatores e (l) 12 fatores.

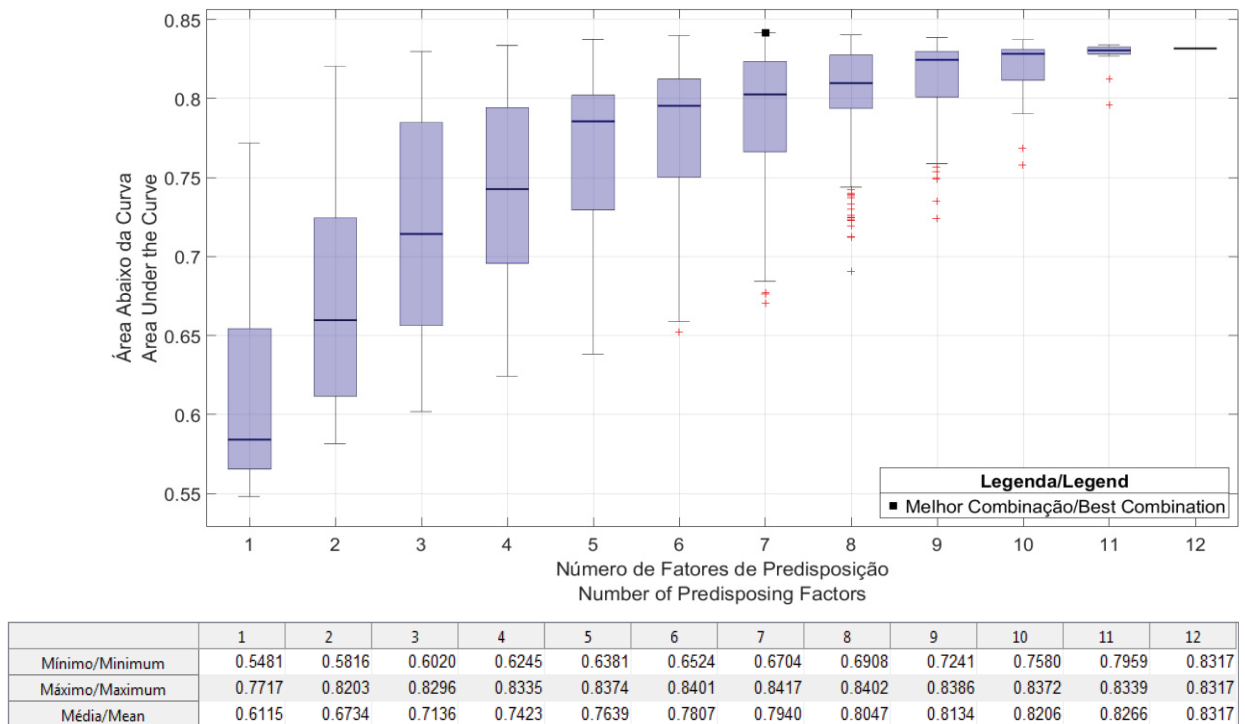
Os resultados apresentados anteriormente mostram uma variação importante no ajuste dos modelos aos dados de entrada. A projeção das AAC's das curvas de sucesso dos modelos produzidos em função do número de fatores predisposição usados na sua modelação (Figura 52), mostra o aumento no valor médio do ajuste dos modelos aos dados entrada, com o incremento do número de fatores de predisposição, para ambas as tipologias. No entanto, é também possível verificar que concomitantemente ao aumento do número de fatores utilizados há uma clara diminuição na variabilidade dos resultados obtidos, dentro do mesmo conjunto de modelos definidos com o mesmo número de fatores, e uma estagnação do melhor resultado.

Tal como ficou concluído anteriormente, verifica-se que os modelos desenvolvidos para os desabamentos (Figura 52a) apresentam um melhor ajuste aos dados de entrada, com valores de AAC que variam entre 0,6136, com um fator, e 0,951, com sete fatores. Os modelos desenvolvidos para os deslizamentos (Figura 52b) apresentam AAC's que variam entre 0,5481, com um fator, e 0,8417, com sete fatores, valores inferiores quando comparados com os desabamentos, pelas razões já anteriormente referidas.

As melhores combinações obtidas para desabamentos e deslizamentos, foram desenvolvidas com sete fatores de predisposição: área de contribuição, densidade de drenagem, declive, exposição, geologia, insolação e uso do solo. Tal demonstra que os melhores modelos de suscetibilidade obtidos não são compostos exclusivamente por fatores de predisposição com a melhor capacidade de discriminação espacial de suscetibilidade, mas sim por um conjunto de fatores em que esta capacidade pode ser bastante heterogénea (Tabela 18). Assim, conclui-se que, contrariamente ao que alguns autores propuseram (*e.g.* Zêzere *et al.*, 2008; Blahut *et al.*, 2010; Piedade *et al.*, 2010), a adição sucessiva de fatores de predisposição aos modelos, por ordem decrescente da sua capacidade de discriminar o território relativamente à ocorrência de movimentos de vertente, não garante que seja encontrada a melhor combinação de fatores para produzir o melhor modelo de suscetibilidade a movimentos de vertente.



(a)



(b)

Figura 52 | Ajuste dos modelos de suscetibilidade em função do número de fatores de predisposição usados em cada modelo para: (a) desabamentos e (b) deslizamentos.

Com o objetivo de compreender a causa da diminuição da variabilidade no ajuste dos modelos aos dados de entrada e da estagnação do melhor resultado obtido com o aumento do número de fatores, estudou-se a variação do número de condições únicas de terreno esperadas e observadas em cada uma das 4.095 combinações. Na figura 53 apresentam-se o número de condições únicas esperadas e observadas em função do número de fatores de predisposição que constituem a combinação.

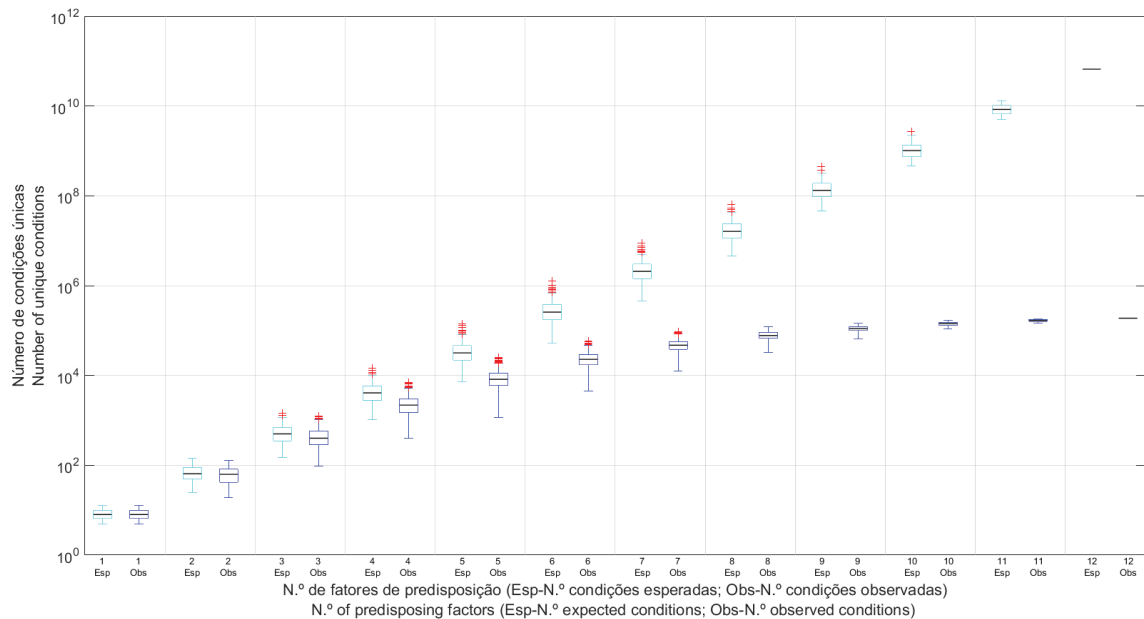


Figura 53 | Variação do número de condições únicas esperadas e observadas em função do número de fatores de predisposição considerados em cada modelo.

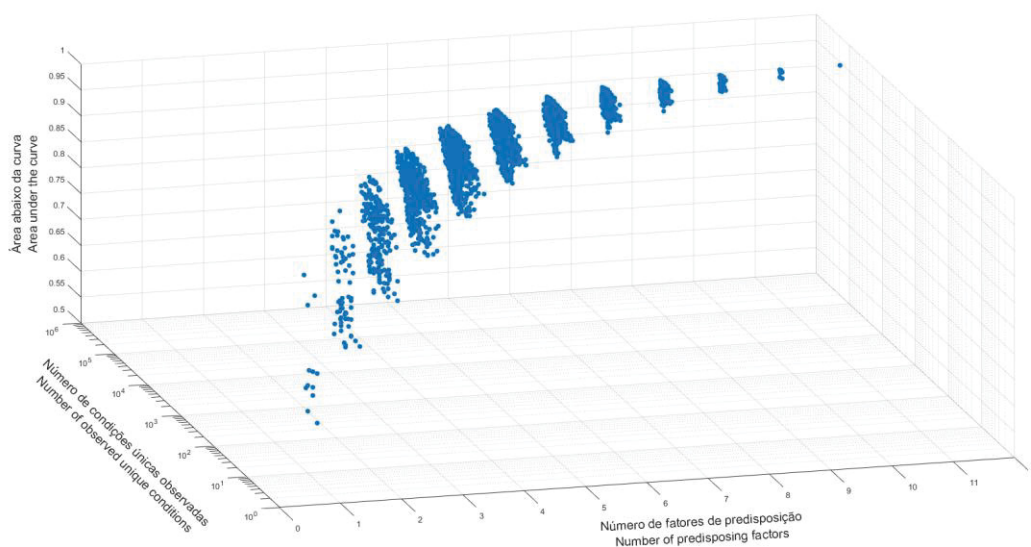
Tal como seria de esperar, verifica-se que o número de condições únicas esperadas exibe um crescimento exponencial, sensivelmente constante, com o incremento do número de fatores de predisposição, obtendo-se um máximo de 66.216.150.000 condições únicas esperadas com a combinação composta pelos 12 fatores de predisposição. No entanto, analisando o número de condições únicas observadas verifica-se que o seu incremento apresenta um comportamento distinto do número de condições únicas esperadas, destacando-se que o máximo de condições únicas observadas que apenas atinge 188.734 utilizando os 12 fatores de predisposição.

Embora o número de condições únicas observadas aumente com a inclusão de fatores de predisposição, apresenta com uma taxa de crescimento muito inferior ao número de condições únicas esperadas. A partir da inclusão de 6 fatores de predisposição, ou mais, o aumento de condições únicas de terreno é atenuado,

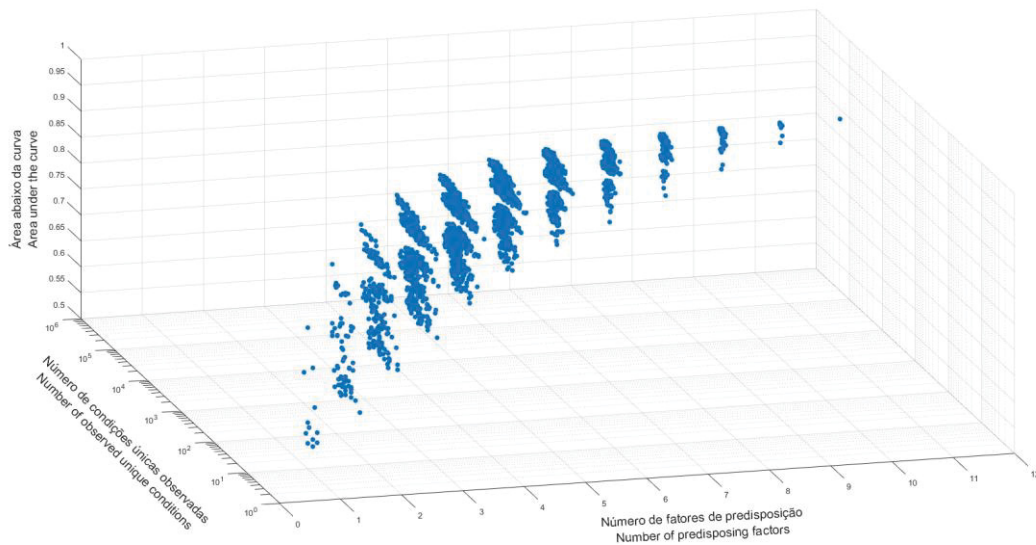
sendo cada vez menor à medida que se adicionam fatores às combinações. A possível dependência condicional entre alguns dos fatores de predisposição utilizados impede a criação de condições únicas de terreno e pode explicar o comportamento díspar observado entre o crescimento do número de condições únicas de terreno esperadas e observadas, relativamente ao aumento de fatores de predisposição nos modelos de suscetibilidade.

A figura 54 mostra os valores de área abaixo da curva das curvas de sucesso e o número de condições únicas de terreno observadas de acordo com o número de fatores predisposição que constituem cada modelo.

Os valores de AAC dos modelos, para duas tipologias, tendem a aumentar de forma não linear com o aumento do número de fatores de predisposição presentes nos modelos, bem como o número de condições únicas de terreno dos modelos, observando-se uma atenuação do crescimento com a adição do sétimo fator de predisposição. Estes resultados demonstram que a incapacidade do território gerar novas condições únicas de terreno com a adição de fatores de predisposição, pode influenciar o aumento da qualidade do ajuste dos modelos aos dados de entrada. Tal demonstra que mesmo que sejam adicionados indiscriminadamente mais fatores de predisposição aos modelos, se não for garantida a sua dependência condicional e, concomitantemente, o desenvolvimento de novas condições únicas de terreno, apenas estaremos a aumentar o peso computacional do algoritmo para gerar o nosso modelo de suscetibilidade sem que esse peso se reflita num aumento significativo da qualidade do ajuste dos modelos aos dados de entrada.



(a)



(b)

Figura 54 | Variação da AUC e do número de condições únicas do terreno observadas em função do número de fatores de predisposição que constituem os modelos: (a) para desabamentos e (b) para deslizamentos.

4.3.3. Capacidade preditiva dos modelos de suscetibilidade

Os mapas de suscetibilidade devem ser validados para se avaliar a sua capacidade preditiva em relação à ocorrência de futuros movimentos de vertente, sob pena de serem considerados inúteis e inconsistentes do ponto de vista científico. A análise da capacidade preditiva foi feita individualmente para cada tipologia de movimentos de vertente, sendo a variável dependente alvo de partição aleatória em dois grupos: um grupo utilizado para a modelação (MOD) e outro utilizado para a validação (VAL). Na tabela 20 apresenta-se um resumo das características das partições para as duas tipologias de movimentos de vertente.

Tabela 20 | Resumo das características da partição dos grupos de movimentos de vertente.

Tipologia	Partição	N.º de movimentos de vertente	Área instabilizada (m ²)	Unidades matriciais
Desabamentos (DSB-TOT)	Grupo de modelação (DSB-MOD)	43	185.991,4	7424
	Grupo de validação (DSB-VAL)	128	62.569,5	2459
Deslizamentos (DSL-TOT)	Grupo de modelação (DSL-MOD)	152	73.481,4	3106
	Grupo de validação (DSL-VAL)	151	87.216,9	3313

As curvas de predição resultantes dos 4.095 modelos suscetibilidade gerados para cada uma das tipologias de movimentos de vertente em estudo são apresentadas na Figura 55.

Para as duas tipologias de movimentos de vertente, os resultados mostram uma variação importante na capacidade preditiva, como consequência da variação do número de fatores de predisposição que constituem os modelos, tal como observado no comportamento das curvas de sucesso. No caso dos desabamentos (Figura 55a), verifica-se que a capacidade preditiva dos modelos atinge melhores resultados comparativamente os deslizamentos. A análise da figura 55b permite verificar uma grande variabilidade na capacidade preditiva dos modelos para os deslizamentos, estando presentes modelos com valores de AAC das curvas de predição abaixo de 0,5.

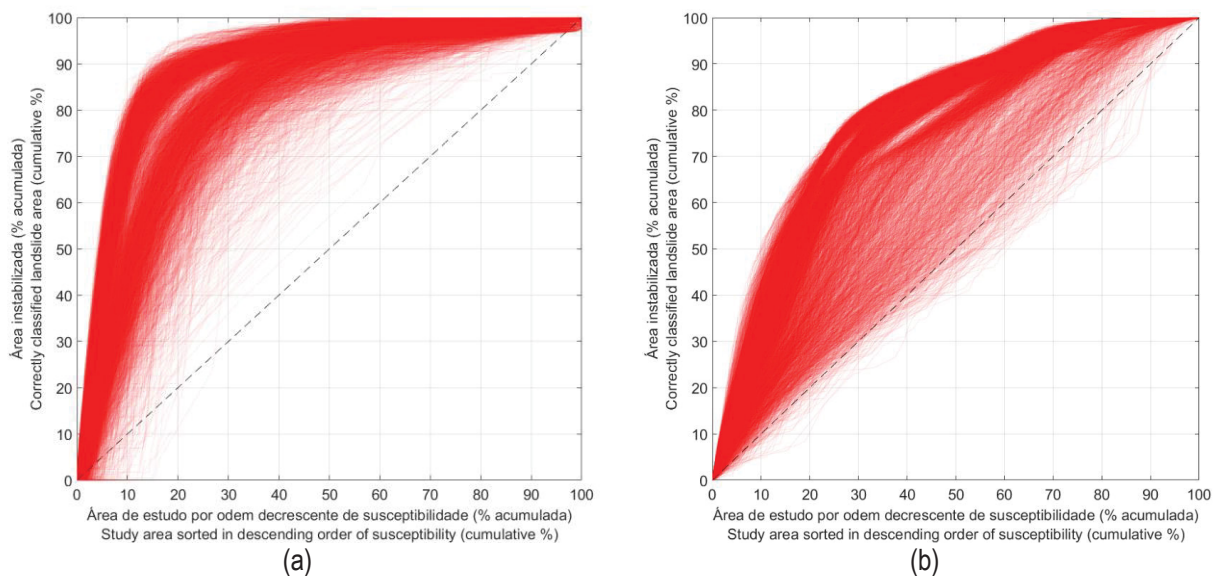


Figura 55 | Curvas de predição resultantes dos 4095 modelos de suscetibilidade gerados: (a) para desabamentos e (b) para deslizamentos.

Na figura 56 são apresentadas as curvas de sucesso dos melhores modelos de suscetibilidade desenvolvidos, como o ditou o melhor resultado de ajuste dos modelos de suscetibilidade aos dados de entrada, e as respetivas curvas de predição, elaboradas com os grupos MOD e validadas com os grupos VAL para os desabamentos (Figura 56a) e para os deslizamentos (Figura 56b).

No caso dos desabamentos a curva de sucesso tem AAC igual a 0,95 e curva de predição igual 0,89. No caso dos deslizamentos a curva de sucesso tem AAC igual a 0,84 e curva de predição igual 0,79. De acordo com os resultados obtidos é possível atestar a robustez estatística das partições do inventário referentes aos

desabamentos e aos deslizamentos, por não se registar um afastamento significativo entre as curvas de sucesso e de predição. De acordo com Guzzetti (2005), os resultados obtidos demonstram que os melhores modelos possuem uma boa capacidade preditiva.

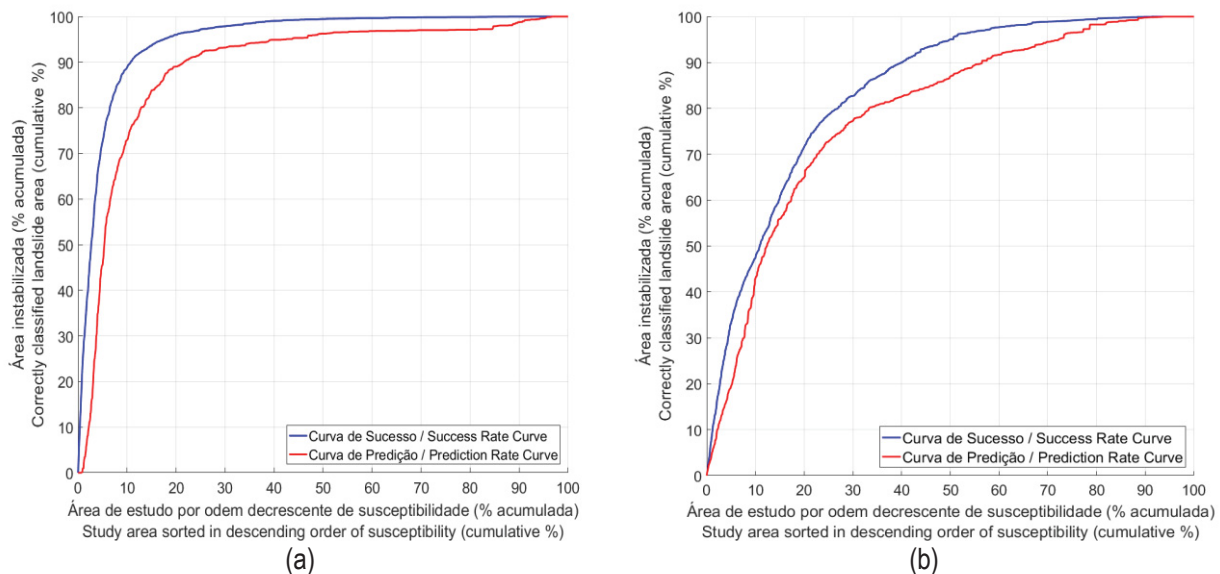


Figura 56 | Curvas de sucesso e predição dos melhores modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente: (a) para desabamentos e (b) para deslizamentos.

A partir da análise das curvas de sucesso, conclui-se que para os desabamentos 25% da área de estudo classificada como mais suscetível identifica 97% da área instável, e que para os deslizamentos 25% da área de estudo classificada como mais suscetível identifica 79% da área instável.

4.3.4. Classificação dos mapas finais

Devido ao facto de os mapas resultantes dos modelos de suscetibilidade desenvolvidos apresentarem uma variação de valores contínuos, torna-se fundamental a sua classificação com o objetivo de facilitar a sua utilização e interpretação. Os mapas finais contemplam 3 classes, com designação qualitativa: elevada, moderada e baixa.

Foram comparados dois métodos de classificação distintos: i) baseado nos tercis da área de estudo e ii) na interpretação das curvas de sucesso.

A classificação dos mapas finais de suscetibilidade com base no método dos tercis (Tabelas 21 e 22), foi obtida pela divisão do território da área de estudo em 3 classes de igual dimensão tendo em conta a ordenação hierárquica da suscetibilidade.

Para a classificação dos mapas de suscetibilidade baseada na interpretação da curva de sucesso (Tabelas 23 e 24) foram utilizados os seguintes critérios: i) A classe de suscetibilidade elevada contém 90% da área total instabilizada; ii) a classe de suscetibilidade moderada, contém 95% da área total instabilizada em conjunto com a classe moderada; e iii) a classe de suscetibilidade reduzida ou nula, em conjunto com as restantes classes de suscetibilidade, tem de conter 100% da área instabilizada.

Tabela 21 | Razão de eficiência (rE_i) das classes de suscetibilidade do mapa desenvolvido considerando como critério de separação das classes os tercis da área de estudo para desabamentos.

Classes de suscetibilidade	Área de estudo (% acumulada)	Área instabilizada (% acumulada)	rE_i	Eficiência
Elevada	3,3	98,2	2,950	Significativa
Moderada	66,6	99,8	0,047	Não significativa
Baixa	100	100	0,006	Muito significativa

Tabela 22 | Razão de eficiência (rE_i) das classes de suscetibilidade do mapa desenvolvido considerando como critério de separação das classes os tercis da área de estudo para deslizamentos.

Classes de suscetibilidade	Área de estudo (% acumulada)	Área instabilizada (% acumulada)	rE_i	Eficiência
Elevada	3,3	85,9	2,581	Significativa
Moderada	66,6	98,5	0,376	Não significativa
Baixa	100	100	0,046	Muito significativa

Tabela 23 | Razão de eficiência (rE_i) das classes de suscetibilidade do mapa classificado por interpretação da curva de sucesso para desabamentos.

Classes de suscetibilidade	Área de estudo (% acumulada)	Área instabilizada (% acumulada)	rE_i	Eficiência
Elevada	10,1	90,0	8,391	Muito significativa
Moderada	17,5	95,0	0,742	Não significativa
Baixa	100	100	0,061	Muito significativa

Tabela 24 | Razão de eficiência (rE_i) das classes de suscetibilidade do mapa classificado por interpretação da curva de sucesso para deslizamentos.

Classes de suscetibilidade	Área de estudo (% acumulada)	Área instabilizada (% acumulada)	rE_i	Eficiência
Elevada	39,9	90,0	2,251	Muito significativa
Moderada	49,8	95,0	0,509	Não significativa
Baixa	100	100	0,100	Significativa

No caso dos desabamentos, relativamente à classe de suscetibilidade elevada, verifica-se que o método de classificação baseado na análise da curva de sucesso apresenta uma razão de eficiência mais elevada ($rE_i=8,39$) em comparação o método baseado nos tercis da área de estudo. Para a classe de suscetibilidade moderada, obteve-se uma razão de eficiência considerada “não significativa” (Chung e Fabbri, 2003) em ambos os métodos de classificação. Relativamente à classe de suscetibilidade baixa, obteve-se uma razão de eficiência “muito significativa” (Chung e Fabbri, 2003), recorrendo à classificação baseada na curva de sucesso e nos tercis, sendo que este último promove a melhor razão de eficiência ($rE_i=0,006$). Pelo facto da classificação interpretação da curva de sucesso apresentar em duas das três classes de suscetibilidade consideradas “muito significativas” (Chung e Fabbri, 2003), considera-se este método de classificação, o melhor para a elaboração do mapa de suscetibilidade a desabamentos (Figura 57a).

Relativamente aos deslizamentos, para a classe de suscetibilidade elevada, verifica-se que o método dos tercis da área de estudo é aquele que promove uma razão de eficiência mais elevada ($rE_i=2,58$), muito próximo do método de interpretação da curva de sucesso ($rE_i=2,25$). Para a classe de suscetibilidade moderada, obteve-se uma razão de eficiência similar recorrendo à classificação baseada nos tercis e na interpretação da curva de sucesso. Relativamente à classe de suscetibilidade baixa, a abordagem de classificação baseada nos tercis obtém o melhor resultado ($rE_i=0,04$). Assim sendo, considera-se o método dos tercis da área de estudo, o melhor para a classificação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos (Figura 58b).

Os mapas finais de suscetibilidade a desabamentos e deslizamentos, apresentados nas figuras 57 e 58, mostram que as áreas de maior suscetibilidade a desabamentos estão localizadas em condições muito restritas da área de estudo, nomeadamente ao longo de arribas muito escarpadas, compostas por rochas muito fraturadas. Por outro lado, as áreas de maior suscetibilidade a deslizamentos ocupam áreas mais vastas, principalmente ao longo dos vales das linhas de água e de outras encostas íngremes, compostas por materiais mais antigos e muito alterados.

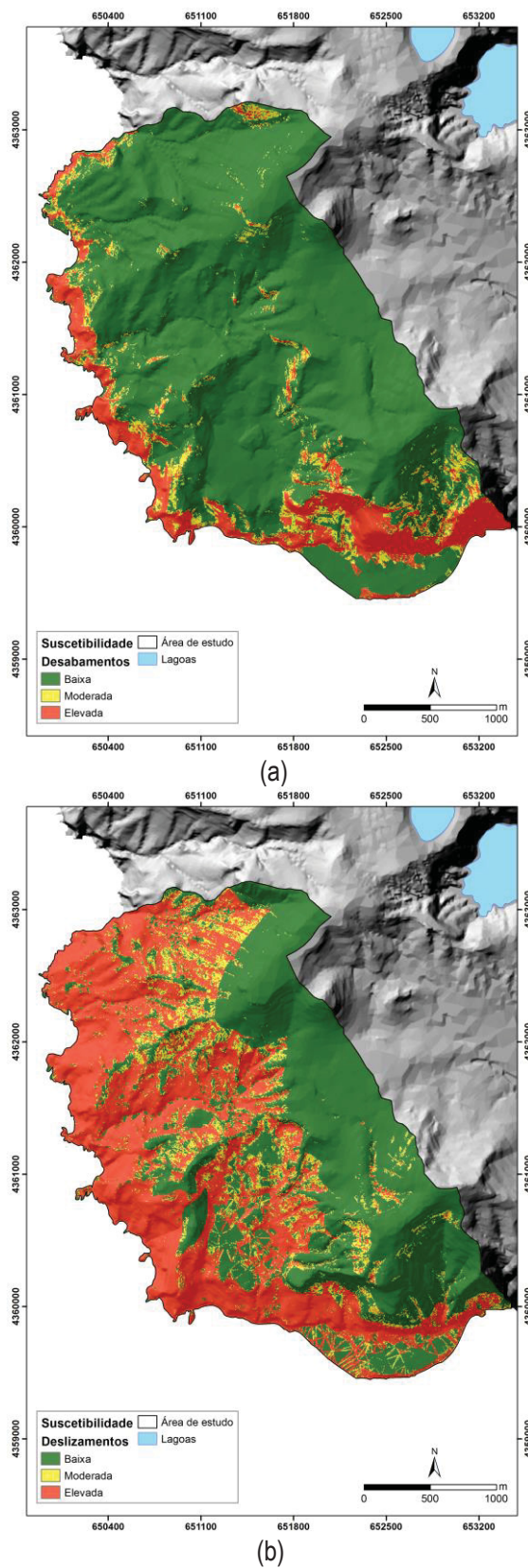
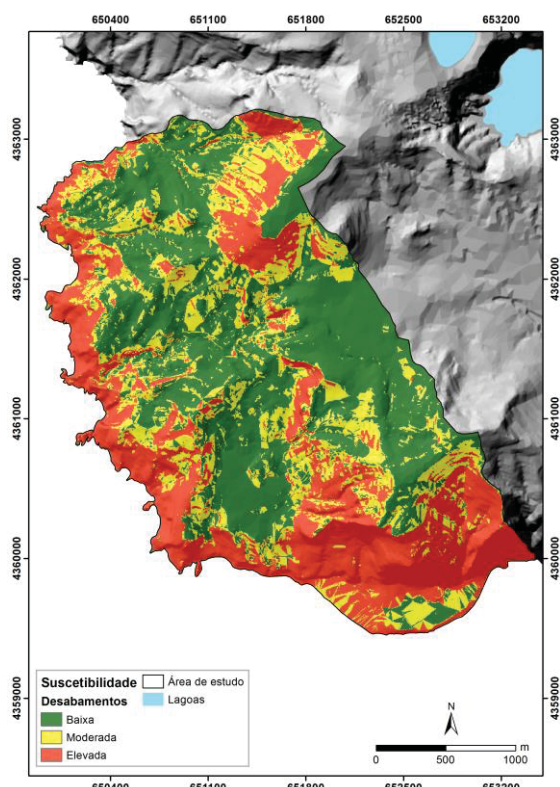
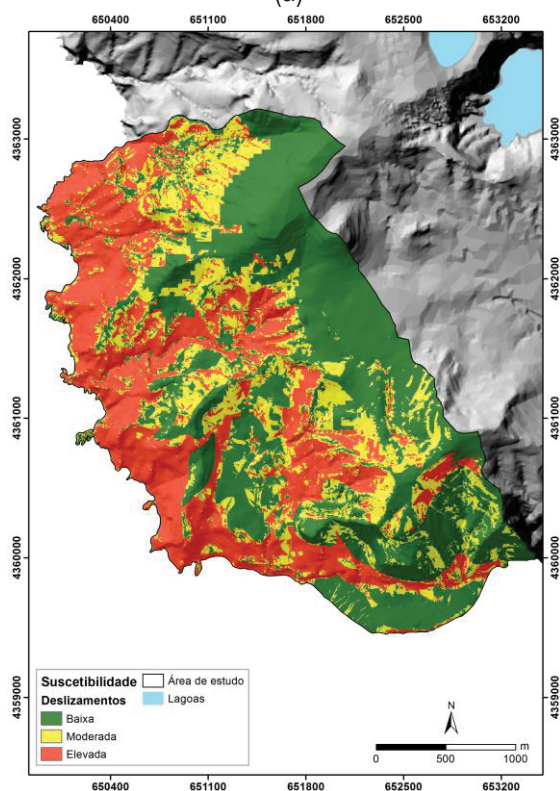


Figura 57 | Mapas finais de suscetibilidade considerando como critério de classificação a interpretação da curva de sucesso: para: (a) desabamentos e (b) deslizamentos.



(a)



(b)

Figura 58 | Mapas finais de suscetibilidade considerando como critério de classificação a separação das classes os tercis da área de estudo: para: (a) desabamentos e (b) deslizamentos.

5. ANÁLISE DOS PLANOS E INSTRUMENTOS DE GESTÃO TERRITORIAL E AVALIAÇÃO DO RISCO ESPECÍFICO

5.1. INSTRUMENTOS DE GESTÃO TERRITORIAL (IGT)

A localização de pessoas e bens, desde o início da ocupação humana, não se deu ao acaso, estando relacionada com fatores como o clima, o relevo ou a disponibilidade de recursos que foram determinantes para a fixação das populações. A preocupação com o ordenamento do território surgiu inicialmente dentro dos grandes núcleos populacionais e habitacionais, com o urbanismo a assumir o principal papel em termos de melhoria estética e sanitária (Gaspar, 2005). Posteriormente, as áreas rurais começaram a ser integradas nas atividades de planeamento quando as cidades se expandiram pelo território ao longo das vias existentes, formando bolsas e pequenos aglomerados, fragmentando o território e articulando-se com a natureza, tornando-as policêntricas e assentes na mobilidade (Carvalho, 2009).

No decorrer da década de 90 o ordenamento do território em Portugal é marcado por uma série de acontecimentos no que respeita à criação de instrumentos legais e de planeamento. Os Planos Diretor Municipal (PDM) foram instituídos em 1982 pelo Decreto-Lei n.º 208/82 de 26 de maio e os Planos Regionais de Ordenamento do Território (PROT) em 1983 pelo Decreto-Lei n.º 338/83 de 20 de julho. Mais de uma década depois, em 1998, pela Lei n.º 48/98 de 11 de agosto, entrou em vigor a Lei de Bases da Política de Ordenamento do Território e de Urbanismo (LBPOTU), que introduziu alterações na tipologia dos instrumentos de planeamento, criando por um lado novos tipos de planos, e por outro, alterando o regime jurídico de alguns planos já existentes.

O Programa Nacional de Política de Ordenamento do Território (PNPOT) é exemplo de um plano criado a partir do surgimento da LBPOTU, e é um instrumento de cariz estratégico que tem como objetivo traçar as orientações para o modelo de organização espacial do país, tendo em conta o sistema urbano, redes de infraestruturas e equipamentos, áreas de interesse nacional em termos agrícolas, ambientais e patrimoniais.

A LBPOTU estabelece o regime jurídico dos Instrumentos de Gestão Territorial e enquadra-os em quatro diferentes categorias de acordo com as funções específicas de cada: instrumentos de desenvolvimento territorial; instrumentos de planeamento territorial; instrumentos de política sectorial e, instrumentos de natureza especial. No artigo 7º, n.º 2, a LBPOTU estabelece uma organização para os Instrumentos de

Gestão Territorial baseada no nível de interesse prosseguido por cada um deles, tendo estabelecido três âmbitos: Nacional, Regional e Municipal aos quais estão associados vários programas e planos.

Ao nível nacional é definido o quadro estratégico para o ordenamento do espaço nacional, onde são estabelecidas inúmeras diretrizes a considerar no ordenamento regional e municipal e é igualmente estabelecida a compatibilização entre os diversos instrumentos de política sectorial com incidência territorial, instituindo quando necessário os instrumentos de natureza especial. Ao nível regional é definido o quadro estratégico para o ordenamento do espaço regional em estreita articulação com as políticas de desenvolvimento nacional e de desenvolvimento económico e social, estabelecendo as diretrizes orientadoras do ordenamento municipal. Ao nível municipal é definido, de acordo com as diretrizes de âmbito nacional e regional e com opções próprias de desenvolvimento estratégico, o regime de uso do solo e respetiva regulamentação.

Os Instrumentos de Gestão Territorial devem ser ferramentas de carácter alterável, nos quais conste as transformações ocorridas no território e que implicam uma adaptação contínua das ferramentas de ordenamento do território às suas exigências e necessidades. A revisão e alteração dos planos permite, no primeiro caso, uma transformação nos conteúdos do plano por forma a beneficiar todos os interessados e, no segundo caso, introduzir apenas pequenas modificações que não afetam a integridade do plano.

5.1.1 O risco nos Instrumentos de Gestão Territorial

Os conceitos de perigo e de risco encontram-se presentes na legislação de forma dispersa, não existindo atualmente um documento legal que trate esta temática de forma abrangente e focada nas diferentes tipologias e formas de ocorrência. Para os vários perigos, existe um conjunto de legislação que enquadra os procedimentos a ter em conta ao nível das fases de prevenção, preparação, resposta e recuperação, bem como a organização e delegação de competências a entidades dos mais variados quadrantes da sociedade que participam na gestão de catástrofes. Uma análise mais aprofundada à legislação permite ainda verificar que o termo “risco” não é utilizado de forma clara, e inequívoca, e é muitas vezes confundido com “perigo”, quando o assunto em questão é a adoção de medidas de prevenção e gestão do mesmo.

O PNPTOT foi o primeiro IGT que teve em consideração os riscos e as vulnerabilidades territoriais para o apoio à definição das políticas de desenvolvimento do país, dando destaque às diferentes características sociais, geográficas, morfológicas e climáticas do território nacional. A integração da análise do risco

tornou-se um aspeto ter em conta no processo de planeamento do território a curto, médio e longo prazo, dependendo do programa de desenvolvimento e do âmbito territorial. A necessidade da elaboração e revisão dos IGT abriu espaço para a abordagem a novas temáticas e incluir a prevenção como fator preponderante para uma correta utilização dos espaços, para a segurança de pessoas e bens e para aumentar a capacidade de previsão espacial e temporal de futuros eventos, além de permitir uma melhor adequação e elaboração de planos de emergência de proteção civil, a redução dos esforços de mitigação e também a minimização dos danos económicos e sociais.

Segundo Pereira (2009), a definição da localização de uma população ou de atividades económicas num determinado local, deverá ser antecedida por uma avaliação da perigosidade, e a prevenção do risco deve ser uma prioridade da política de ordenamento de território, enquanto que no sentido inverso o próprio ordenamento do território pode dar um contributo na ponderação do risco para as tomadas de decisão associadas à (re)configuração de manchas populacionais.

Fica evidente a importância, mas sobretudo a necessidade, da elaboração de estudos da análise de risco e a devida inclusão e articulação nos planos de ordenamento do território e nos planos de emergência de proteção civil. A gestão do território resultará tanto melhor quando melhor for a articulação entre equipas que atuam no planeamento e definem restrições e condicionantes à ocupação do solo e autoridades do planeamento de emergência, de modo a reduzirem a probabilidade de ocorrência de fenómenos com carácter danoso (Teles, 2010).

5.1.2 Instrumentos de Gestão Territorial que regulamentam a área de estudo.

Neste subcapítulo são apresentados e especificados, os planos e Instrumentos de Gestão Territorial que regulamentam toda a área em estudo (Tabela 25), considerando o âmbito de aplicação, a função específica e a designação da legislação que os cria e regulamenta.

Tabela 25 | Instrumentos de Gestão Territorial que regulamentam a freguesia do Lajedo.

Âmbito	Planos	Legislação	
Âmbito Nacional	Programa Nacional de Política de Ordenamento do Território	Lei n.º 58/2007, de 4 de setembro	
Âmbito Regional	Planos setoriais	Plano Regional de Ordenamento do Território dos Açores	Decreto Legislativo Regional n.º 26/2010/A, de 12 de agosto
		Plano Regional da Água	Decreto Legislativo Regional n.º 19/2003/A, de 23 de abril
		Plano Sectorial da Rede Natura 2000 da Região Autónoma dos Açores	Decreto Legislativo Regional n.º 20/2006/A, de 6 de junho
		Plano Estratégico de Prevenção e Gestão de Resíduos dos Açores	Decreto Legislativo Regional n.º 6/2016/A, de 29 de março
		Plano de Ordenamento Turístico da Região Autónoma dos Açores	Decreto Legislativo Regional n.º 38/2008/A, de 11 de agosto
		Plano Sectorial de Ordenamento do Território para as Atividades Extrativas da Região Autónoma dos Açores	Decreto Legislativo Regional n.º 19/2015/A, de 14 de agosto
		Plano de Gestão de Riscos de Inundações da Região Autónoma dos Açores	Decreto Legislativo Regional n.º 20/2016/A, de 10 de outubro
		Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores 2016-2021	Decreto Legislativo Regional n.º 1-A/2017/A, de 6 de fevereiro
	Planos Especiais de Ordenamento do Território	Plano de Ordenamento da Orla Costeira da ilha das Flores	Decreto Regulamentar Regional n.º 24/2008/A, de 26 de novembro
Âmbito Municipal	Plano Diretor Municipal das Lajes das Flores	Decreto Regulamentar Regional n.º 3/2007/A, de 2 de fevereiro	

A análise realizada aos IGT que regulamentam a área de estudo incide sobre a presença ou ausência de componentes de avaliação do perigo de movimentos de vertente, bem como a sua consideração para delimitação de áreas de ocupação e definição de normas. Devido à não cedência e impossibilidade de consulta de todos os elementos constituintes dos planos e IGT, a análise foi feita com base na interpretação da legislação que os regulamenta e nos vários elementos fundamentais e complementares disponíveis, como é o caso das plantas síntese, relatórios técnicos e não técnicos. Não foram alvo de análise o Plano Sectorial da Rede Natura 2000 da Região Autónoma dos Açores, o Plano Estratégico de Prevenção e Gestão de Resíduos dos Açores, o Plano Sectorial de Ordenamento do Território para as Atividades Extrativas da Região Autónoma dos Açores e o Plano de Gestão de Riscos de Inundações da Região Autónoma dos Açores, por se considerar não ser relevante a existência de componentes de avaliação do perigo de movimentos de vertente no âmbito destes planos.

Programa Nacional de Política de Ordenamento do Território

O Programa Nacional de Política de Ordenamento do Território (PNPOT) estabelece as grandes opções com relevância para a organização do território nacional, consubstancia o quadro de referência a considerar na elaboração dos demais instrumentos de gestão territorial e constitui um instrumento de cooperação com os demais Estados membros para a organização do território da União Europeia (artigo 1.º).

No Relatório PNPOT, são identificados os seis domínios distribuídos por 24 grandes problemas que Portugal terá de enfrentar até ao limite do horizonte temporal do PNPOT. O primeiro dos domínios corresponde aos recursos naturais e gestão de riscos, o que demonstra a crescente importância da consciencialização pública para os problemas que, potencialmente podem afetar as populações ou que contribuem diretamente para a contínua degradação das condições de vida das gerações vindouras.

O Relatório PNPOT considera que a opção pela prevenção de riscos como um dos quatro vetores do modelo territorial tem um grande significado e que *“nas últimas décadas, pela força dos factos e do avanço do conhecimento científico, agudizou-se a consciência de que existem riscos diversos ameaçadores das populações e dos territórios, os quais pela sua dimensão e complexidade devem ser colocados no topo da agenda política”*. No mesmo tópico são identificados os riscos que se consideram como ameaças ao território de Portugal, destacando-se o enquadramento geodinâmico do arquipélago dos Açores que justifica a histórica e intensa atividade sismovulcânica e a vulnerabilidade do território face a estes perigos naturais,

alguns com potencial tsunamigénico. Considera ainda fenómenos hidrológicos extremos que podem implicar a ocorrência de inundações ou de movimentos de massa e o facto da ocupação humana se concentrar na zona costeira, associado à extensão e diversidade tipológica consideráveis, faz com que o impacto negativo da erosão costeira mereça também particular atenção de forma a mitigar os seus potenciais efeitos.

Embora seja dada importância ao enquadramento geográfico, geodinâmico e climático do arquipélago dos Açores, e aos perigos naturais que daí advêm, não existe nenhuma componente de cartografia e análise de riscos, sendo apenas apresentada uma carta de riscos para Portugal Continental.

Planos setoriais

Plano Regional de Ordenamento do Território dos Açores

O Plano Regional de Ordenamento do Território dos Açores (PROTA) tem o objetivo de traduzir em termos espaciais os grandes objetivos de desenvolvimento económico e social sustentáveis formulados para o arquipélago e estabelecer as medidas de articulação, a nível regional, das políticas estabelecidas no PNPT e nos planos sectoriais preexistentes ou em elaboração, bem como das políticas e medidas de relevância regional contidas nos Planos Especiais de Ordenamento do Território (PEOT) e nos PMOT, culminando no objetivo de servir de quadro de referência para a elaboração de planos especiais, intermunicipais e municipais de ordenamento do território.

De acordo com o quadro metodológico que orientou os trabalhos do PROTA, a proposta de modelo territorial constitui a síntese das implicações sobre o território do arquipélago de quatro sistemas estruturantes: i) os sistemas produtivos, que representam as principais fontes de geração de rendimento e de emprego, traduzindo a capacidade endógena de sustentação económica da Região; ii) os sistemas de proteção e valorização ambiental, que representam o quadro de referência biogeofísico do modelo territorial da Região; iii) os sistemas urbano e rural que representam os padrões e as dinâmicas de ocupação urbana e de povoamento rural; e iv) os sistemas de acessibilidades e equipamentos que integram as redes de infraestruturas, transportes, comunicações, energia e equipamentos coletivos.

As normas orientadoras de gestão e uso do território definem as condições e os critérios de aplicação das opções estratégicas de base territorial e apresentam-se em três grupos fundamentais, atendendo à sua natureza e aplicação: i) normas gerais, que contêm as orientações de carácter geral para o uso e gestão do território da Região Autónoma dos Açores referentes a cada um dos sistemas estruturantes do modelo

territorial; ii) normas específicas de carácter sectorial, que definem as orientações sectoriais ou por domínio de intervenção com implicações relevantes na estruturação do território; e iii) normas específicas de carácter territorial, que incluem orientações específicas a aplicar a cada unidade territorial.

No capítulo V, as normas orientadoras gerais, dos sistemas de proteção e valorização ambiental, consideram que *“os riscos vulcânicos, sísmicos e outros riscos geológicos, bem como os riscos hidrometeorológicos extremos, devem ser contemplados nos planos municipais de emergência e de ordenamento do território, incluindo o zonamento de condicionantes nas áreas potencialmente afetadas”, “o reconhecimento dos elevados riscos naturais, com particular destaque para os resultantes da complexa sismicidade açoriana, bem como fatores externos suscetíveis de alterar as condições naturais, como por exemplo as alterações climáticas, obriga a que todos os IGT a desenvolver para a Região Autónoma dos Açores, integrem a dimensão territorial da incidência dos diversos riscos naturais e tecnológicos nas suas opções”*. Estas normas orientam a entidade regional com competências em matéria de proteção civil a publicar, no prazo de três anos, as cartas de risco sísmico/ geológico, bem como legislação específica sobre o regime de ocupação e transformação destas áreas. Para os sistemas urbano e rural, o PROTA recomenda, nas suas normas gerais, que *“não devem ser permitidas construções em zonas de elevados riscos naturais, tais como zonas de drenagem natural, leitos de cheia e zonas adjacentes, zonas com risco de erosão ou zonas sujeitas a fenómenos de instabilidade geotécnica”*.

O PROTA considera ainda, na articulação com outros IGT, que as propostas de definição de áreas de expansão urbana, a elaborar no âmbito dos PMOT, devem considerar, com particular atenção, a identificação das áreas mais vulneráveis aos diferentes tipos de riscos naturais e tecnológicos, de forma a evitar a sua ocupação.

Plano Regional da Água

O Plano Regional da Água da Região Autónoma dos Açores (PRA) é um plano estratégico que tem por objeto os recursos hídricos da Região integrando comandos de orientação para a atuação dos diversos intervenientes no processo de planeamento e gestão da utilização dos recursos hídricos regionais, em especial para os órgãos legislativos e para a Administração Pública regional (artigo 2.º).

A análise efetuada no PRA, embora integrada, é dividida em nove orientações de estratégia, incluindo o objetivo de prevenir e minorar riscos associados a fenómenos hidrológicos extremos e a acidentes de

poluição (artigo 5.º). O programa do PRA considera, no âmbito da prevenção de riscos naturais, “a *avaliação de fatores climatológicos e hidrológicos relevantes e condicionantes para a implementação de mecanismos de prevenção e intervenção em caso de cheias e deslizamentos*”. Nesta programação estão incluídas medidas e ações que envolvem a elaboração de cartas de risco de deslizamentos a integração de dessas cartas nos instrumentos de planeamento e a adoção de medidas de prevenção de deslizamentos.

No capítulo de caracterização, diagnóstico e análise perspectiva são abordadas as situações de risco naturais, nomeadamente risco de deslizamentos, erosão hídrica, sísmico e vulcânico, sendo também equacionada a problemática ligada às alterações climáticas. O plano considera o “perigo” movimentos de vertente bastante elevado no arquipélago dos Açores, no entanto a abordagem é muito superficial, sem que que exista qualquer cartografia ou análise deste tipo de fenómenos.

Plano de Ordenamento Turístico da Região Autónoma dos Açores

O Plano de Ordenamento Turístico da Região Autónoma dos Açores (POTRAA) define a estratégia de desenvolvimento sustentável do sector do turismo e o modelo territorial a adotar e tem por vocação fundamental agregar os esforços e iniciativas das administrações públicas regional e local e de toda a sociedade açoriana à volta de um conjunto de objetivos comumente partilhados.

O POTRAA define como unidades de organização territorial: os espaços urbanos de eventual desenvolvimento turístico, os espaços específicos de vocação turística, os espaços rurais e outros não diferenciados, os espaços ecológicos de maior sensibilidade e os espaços de potencial conflito.

A planta síntese do POTRAA para a ilha das Flores considera, na área de estudo, espaços urbanos de eventual desenvolvimento turístico, os espaços rurais e outros não diferenciados e os espaços ecológicos de maior sensibilidade. O artigo 9.º clarifica que os espaços urbanos de eventual desenvolvimento turístico correspondem às áreas urbanas e urbanizáveis delimitadas pelos PDM e outros IGT da Região Autónoma dos Açores, onde se podem implantar estruturas de aproveitamento turístico, nomeadamente todas as tipologias de alojamento turístico, restauração, serviços de informação turística e outros equipamentos e serviços de apoio à receção e estada turística. O artigo 11.º refere que os espaços rurais e outros não diferenciados correspondem ao território que remanesce depois de excluídas todas as áreas integradas nas outras unidades de organização territorial e inclui áreas rurais e naturais, sem estatuto de áreas protegidas, e áreas de ocupação humana distinta das áreas urbanas ou urbanizáveis, todas com boa aptidão para a

utilização turística. Nestes espaços é sempre permitida a instalação de empreendimentos de turismo no espaço rural e empreendimentos de turismo de natureza, ficando a construção ou aproveitamento de imóveis existentes para a instalação de empreendimentos turísticos condicionada pelas alíneas a) a e) do ponto 2 do referido artigo. Os espaços ecológicos de maior sensibilidade (artigo 12.º) correspondem às áreas de maior sensibilidade biofísica, com aptidão muito limitada para a utilização turística e fortes condicionamentos à edificabilidade, pelo que é permitida a instalação de unidades de alojamento, nos termos dos regimes de proteção próprios destes espaços, e genericamente a recuperação e valorização de edifícios preexistentes.

O POTRAA não contempla uma análise de suscetibilidade a movimentos de vertente nas suas diretrizes, medidas e indicações para a definição dos espaços de eventual desenvolvimento turístico. Pela análise dos mapas de suscetibilidade obtidos para a área de estudo é possível concluir que existem espaços urbanos de eventual desenvolvimento turístico, espaços rurais e outros não diferenciados e espaços ecológicos de maior sensibilidade que se situam em zonas de elevada suscetibilidade a desabamentos e deslizamentos.

Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores 2016-2021

O PGRH-Açores 2016-2021 visa a proteção e a valorização ambiental, social e económica dos recursos hídricos ao nível das bacias hidrográficas integradas na Região Hidrográfica dos Açores (RH9), incluindo as respetivas águas subterrâneas e as águas costeiras adjacentes, e o cumprimento dos objetivos ambientais e das medidas de proteção e valorização dos recursos hídricos.

Os objetivos estratégicos e os objetivos ambientais definidos pretendem responder às disposições constantes na Diretiva Quadro da Água (DQA), com o propósito último de alcançar o bom estado das águas para cada ilha, enquanto unidade de sub-bacia hidrográfica, e servindo de base ao estabelecimento de medidas relativas às massas de superfície e subterrâneas abrangidas pela referida Diretiva.

O modelo de gestão proposto sugere que o PGRH deve ser articulado com outras políticas de desenvolvimento estratégico relevantes para o setor da água, tanto de âmbito regional como de âmbito nacional, quer ainda de âmbito comunitário, no sentido de darem resposta aos novos paradigmas de gestão de recursos hídricos na região biogeográfica da Macaronésia.

O PGRH-Açores 2016-2021 apresenta uma análise dos perigos e riscos suscetíveis de afetar o território. Na temática do perigo de movimentos de vertente é apresentada uma análise aos fatores de predisposição

e aos fatores desencadeantes, estando incluída uma carta de suscetibilidade, produzida para o Plano de Ordenamento da Orla Costeira da ilha das Flores.

Planos Especiais de Ordenamento do Território

Plano de Ordenamento da Orla Costeira da ilha das Flores

O POOC estabelece as regras a que deve obedecer a ocupação, uso e transformação dos solos ao longo da faixa costeira, englobando uma zona terrestre de proteção, cuja largura máxima é de 500 m contados da linha que limita a margem das águas do mar, e uma faixa marítima de proteção que tem como limite máximo a batimétrica dos 30 m.

No âmbito da avaliação do perigo de movimentos de vertente o POOC da ilha das Flores, tem como princípios e objetivos específicos, a definição de critérios de prevenção das áreas de risco, a identificação de áreas e propostas prioritárias de intervenção para as situações de risco geológico e a proibição de construções em zonas de elevados riscos naturais, tais como zonas de drenagem natural, zonas com risco de erosão ou zonas sujeitas a fenómenos de instabilidade geotécnica (artigo 2.º).

O plano identifica no seu artigo 18.º as áreas vulneráveis, nas quais existe perigo de ocorrência de movimentos de vertente associados à instabilidade de arribas costeiras e de vertentes do interior da ilha das Flores e ainda as áreas expostas ao avanço das águas do mar. As áreas vulneráveis visam a minimização de riscos para pessoas e bens assegurando mecanismos preventivos de transformação e ocupação das áreas que lhe estão afetadas. Pela análise da planta síntese é possível verificar que a delimitação das áreas vulneráveis é concordante com muitas das áreas com elevada suscetibilidade dos mapas obtidos para área de estudo.

O POOC inclui uma carta de suscetibilidade a movimentos de vertente desenvolvida utilizando um método heurístico e, no geral, tem em consideração a análise e avaliação dos perigos presentes no território, tentando sempre que possível implementar medidas de mitigação.

Plano Diretor Municipal das Lajes das Flores

O Plano Diretor Municipal (PDM) das Lajes das Flores, aplica-se a toda a área do concelho das Lajes das Flores, e define o regime de ocupação, uso e transformação do território municipal.

Das classes de espaços estabelecidas em função dos usos dominantes e preferenciais definidas na planta de ordenamento, na área estudo estão presentes as classes de espaços urbanos, de espaços agrícolas não incluídos na RAR, de espaços florestais de produção e de espaços naturais.

Os espaços urbanos são caracterizados por adequado nível de infraestruturação urbana e consolidação edificada, onde o solo se destina predominantemente à edificação. Nos espaços agrícolas não incluídos na RAR e nos espaços florestais de produção podem licenciar-se construções não habitacionais de apoio à respetiva atividade, construções para habitação e construções para empreendimentos de alojamento turístico a classificar como estabelecimentos hoteleiros, apartamentos turísticos, aldeamentos turísticos, parques de campismo e construções para empreendimentos de animação turística. Os espaços naturais são áreas de alta sensibilidade natural, com valores relevantes de carácter cultural, ambiental e ecológico, objeto de proteção específica de modo a salvaguardar a sua manutenção e o seu equilíbrio, com importância pela ocorrência de valores faunísticos e florísticos, e ainda pela sua biodiversidade.

Pela análise da planta de ordenamento é possível verificar a existência de espaços de potencial licenciamento de construções que se encontram em locais de elevada suscetibilidade, de acordo com o mapa obtido para a área de estudo.

Pelo contrário, as servidões administrativas e restrições de utilidade pública, cartografadas na planta de condicionantes, não permitem, nos solos da Reserva Agrícola Regional (RAR), todas as ações que diminuam ou destruam as suas potencialidades ou que se traduzam na sua utilização para fins não agrícolas, designadamente a construção de edifícios, aterros e escavações. No âmbito da Reserva Ecológica Regional (RER) proposta, são proibidas as construções de edifícios, as aberturas de acessos e as passagens de veículos, os depósitos de desperdícios, as alterações de relevo, as destruições de vegetação ou quaisquer outras ações que comprometam a estabilidade física e o equilíbrio ecológico, com exceção das construções efémeras e ligeiras de apoio ao recreio e fruição dos espaços livres. Nas áreas com risco de erosão, arribas, falésias, escarpas e respetivas faixas de proteção são proibidas ações que induzam ou agravem a erosão do solo.

5.2. ELEMENTOS EXPOSTOS: TIPO E CATEGORIAS

A determinação de áreas suscetíveis a movimentos de vertente assume grande importância no ordenamento do território, evitando a ocupação de áreas com elevada suscetibilidade, através da implementação de medidas preventivas. Neste contexto, é fundamental conhecer a localização da população bem como os locais onde se localizam infraestruturas críticas como o património edificado ou as redes de distribuição (transportes, energia, telecomunicações e água).

Classificou-se os edifícios de acordo com o tipo de utilização em cinco categorias: habitação, edifícios públicos, monumentos, indústria e “outros” (Figuras 59 e 60, Tabela 26). Na categoria habitação foram englobados todos os edifícios que se destinam a esse fim. Na categoria edifícios públicos foram reunidas todas as construções pertencentes e/ou utilizadas por instituições que prestam serviço público, nomeadamente, a sede da junta de freguesia do Lajedo, a Escola Primária da Costa e a Casa da Irmandade do Espírito Santo do Lajedo. Nos monumentos foram consideradas a Igreja do Lajedo e a Casa do Espírito Santo da Costa. Na categoria indústria foi englobado apenas o edifício do posto de leite. Na categoria “outros” foram agrupados todos os edifícios que não se incorporam em nenhuma das categorias anteriores, como: garagens, anexos, reservatórios de água ou postos de transformação.

Tabela 26 | Número de edifícios de acordo com o tipo de utilização.

Categoria	Habitação	Públicos	Monumentos	Indústria	Outros	Total
Nº de edifícios	77	3	2	1	133	216

Em termos de rede viária principal (Figura 59), a freguesia do Lajedo é servida por um troço da Estrada Regional de aproximadamente 4,8 km, a partir da qual se desenvolvem as estradas municipais que permitem o acesso aos centros populacionais do Lajedo e Costa. A estrada municipal de 1,4 km de extensão, que possibilita o acesso ao centro do Lajedo, foi construída na década de 1960, sendo posteriormente, na década de 1970, prolongada até às povoações do Campanário e Costa, numa extensão de 2,7 km. Na década de 1990 foi construída uma nova estrada municipal com 816 m de comprimento e 14% de inclinação, que permitiu a ligação da Costa à Estrada Regional. As estradas secundárias na área de estudo, compostas por arruamentos, caminhos carreteiros e de pé posto, totalizam uma extensão de 16,7 km.

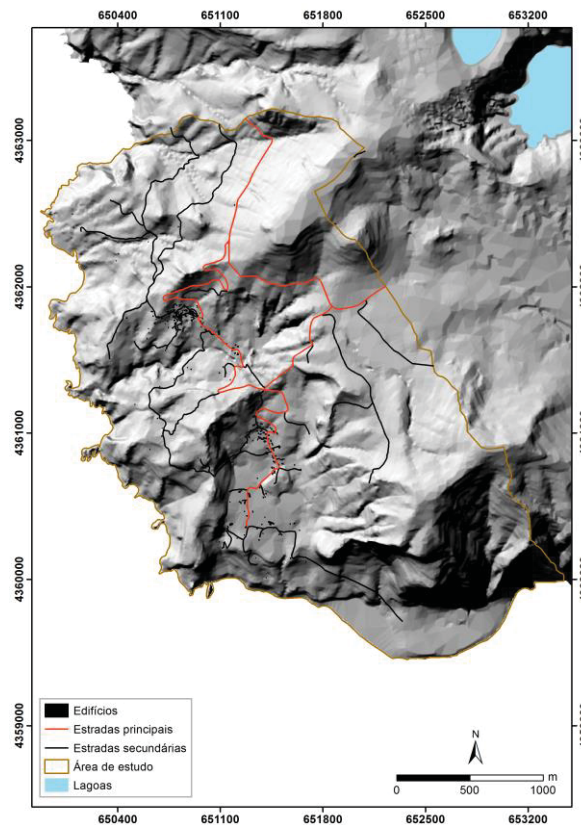


Figura 59 | Distribuição espacial do edificado e da rede viária.

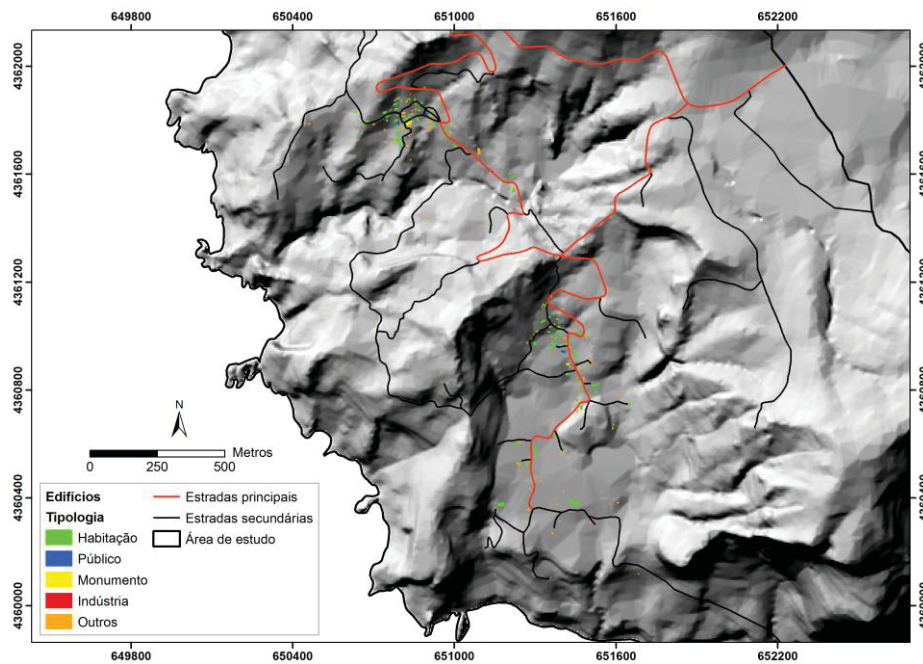


Figura 60 | Distribuição espacial da rede viária e do edificado classificado por tipo de utilização.

5.3. AVALIAÇÃO DO RISCO ESPECÍFICO

Estando o território diferenciado por classes de suscetibilidade a movimentos de vertente, pretende-se conhecer quais os elementos expostos que se localizam em cada classe na área de estudo, quantificando desta forma o respetivo risco específico. Para esta abordagem, foi realizada a sobreposição dos elementos expostos com os mapas de suscetibilidade finais. Para a identificação dos elementos em risco considerou-se o edificado e as vias de comunicação descritos e ilustrados na secção 5.2. Toda a informação foi convertida em *raster* (com UT's matriciais de 5x5 m), de forma a permitir o cruzamento da informação e aferir a percentagem de área intersectada dos elementos expostos pelas diferentes classes de suscetibilidade.

Como resultado da avaliação do risco específico à rutura de desabamentos (Figura 61), conclui-se não existir nenhum edifício em zonas de suscetibilidade elevada e, como tal, o risco específico é baixo. No caso das vias de comunicação verifica-se que 96,9% da sua extensão atravessa áreas de baixa suscetibilidade à rutura de desabamentos. No entanto, 1,5% e 1,7% das vias de comunicação estão classificadas com moderado e elevado risco específico à ocorrência de desabamentos, respetivamente.

Decorrente da avaliação do risco específico à rutura de deslizamentos (Figura 62), verifica-se que 22,4% e 10,5% dos edifícios se encontram em áreas de suscetibilidade elevada e moderada, respetivamente. Na classe de suscetibilidade baixa estão localizados 67,1% dos edifícios da área de estudo. No caso da rede viária constata-se que 35,5% da extensão das vias de comunicação se encontra na classe de suscetibilidade mais elevada. Verifica-se que 13,4% da extensão das vias de comunicação se encontra na classe de suscetibilidade moderada e que 51,1% da sua extensão atravessa áreas de baixa suscetibilidade à rutura de deslizamentos.

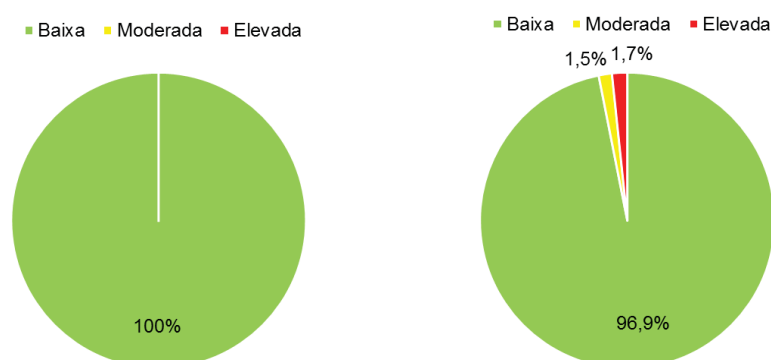


Figura 61 | Percentagem de a) edifícios e b) extensão de vias de comunicação localizados em cada classe de suscetibilidade a desabamentos.

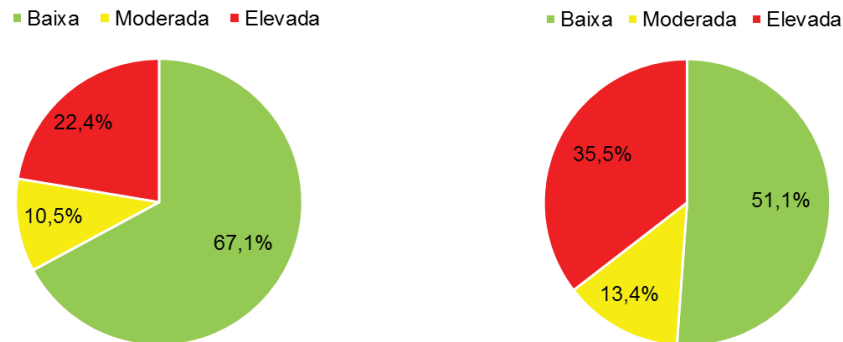


Figura 62 | Percentagem de a) edifícios e b) extensão de vias de comunicação localizados em cada classe de suscetibilidade a deslizamentos

Uma análise mais detalhada do risco específico dos elementos expostos na área de estudo, considerando a rutura de desabamentos e deslizamentos pode ser feita através das Figuras 63, 64, 67, e 68.

Pela análise da avaliação do risco específico dos edifícios por tipologia de utilização à rutura de desabamentos (Figura 63), verifica-se que nenhum dos edifícios se encontra em áreas de suscetibilidade elevada e moderada, e, como tal, o risco específico é baixo. No caso da rede viária (Figura 64) constata-se que na classe de suscetibilidade elevada e moderada não está abrangido nenhum troço das estradas principais. No entanto, verifica-se que 0,9 km das estradas secundárias (4,5% do total de estradas secundárias) se localizam em áreas de suscetibilidade elevada e moderada, correspondendo ao caminho de acesso à Rocha Alta (Figura 65 e 66).

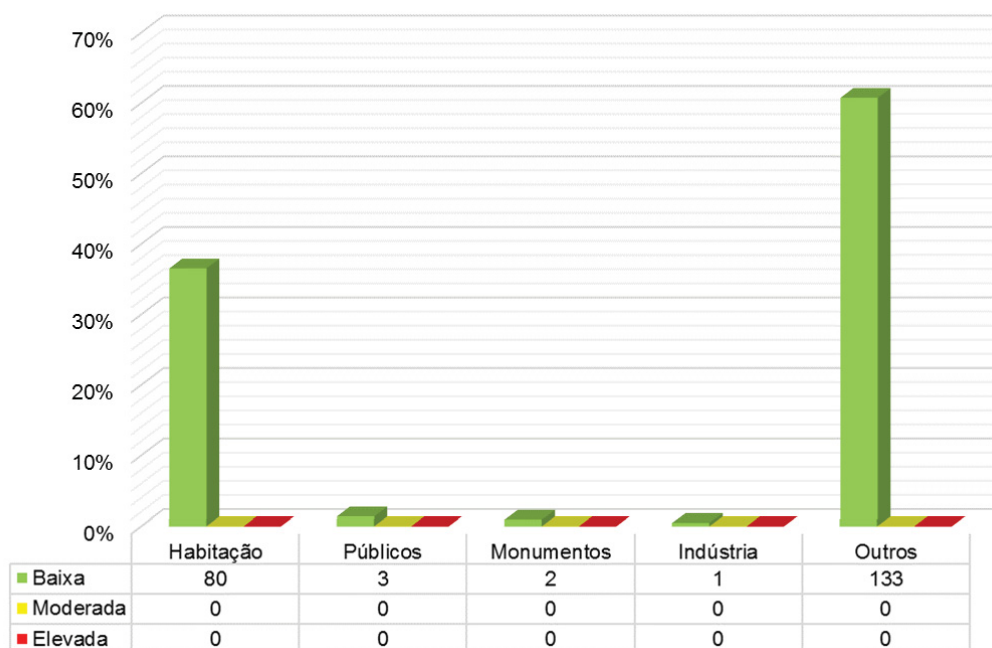


Figura 63 | Percentagem e número de edifícios por tipologia localizados em cada classe de suscetibilidade a desabamentos.

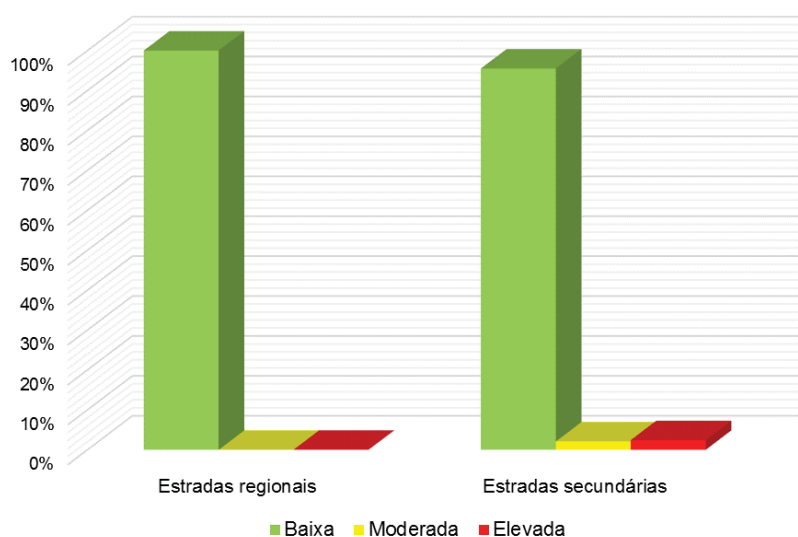


Figura 64 | Percentagem de vias de comunicação por tipologia localizados em cada classe de suscetibilidade a desabamentos.

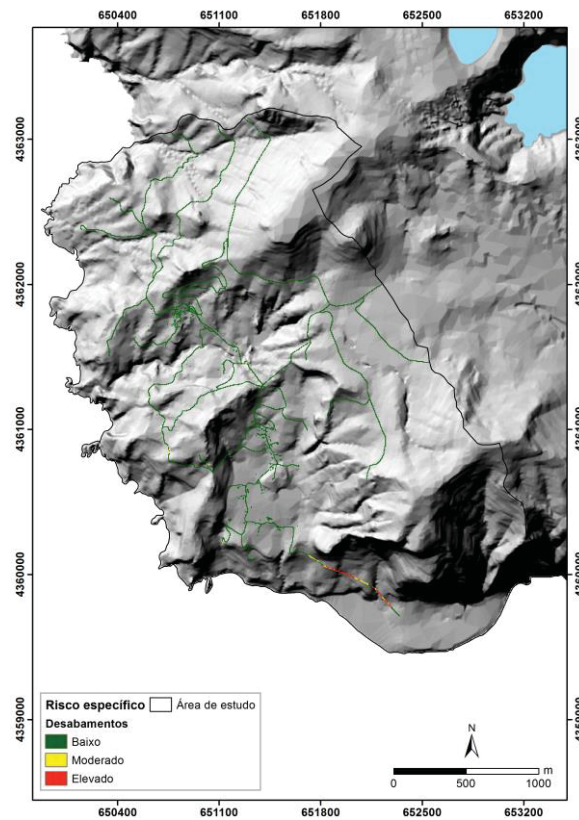


Figura 65 | Risco específico à rutura de desabamentos dos elementos expostos na área de estudo.

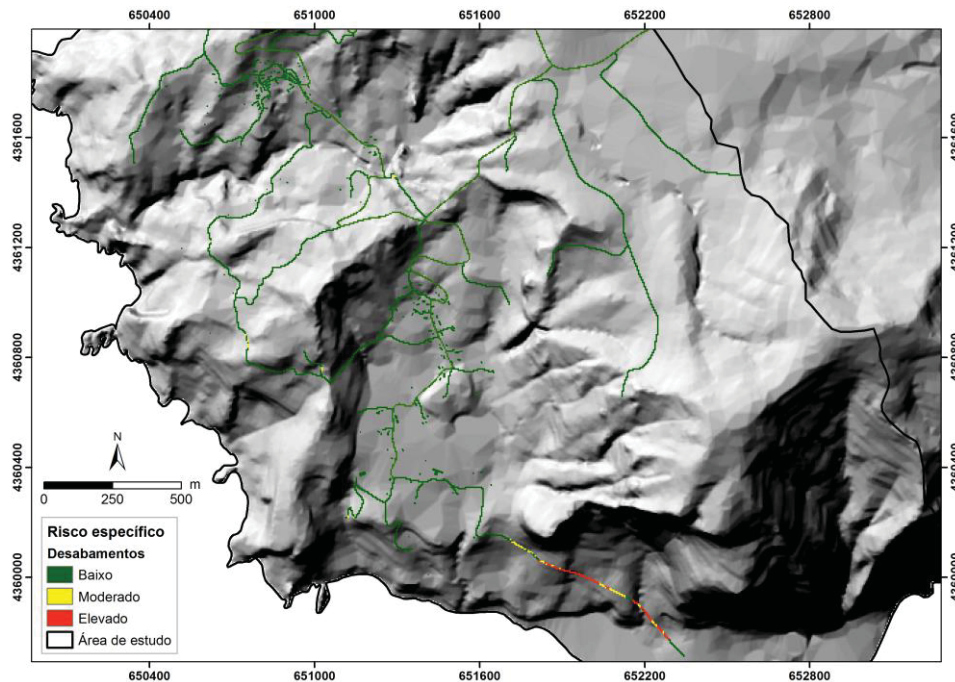


Figura 66 | Risco específico à rutura de desabamentos dos elementos expostos na área de estudo (pormenor).

Resultante da avaliação do risco específico dos edifícios por tipologia de utilização à rutura de deslizamentos (Figura 67), ainda que a maioria dos edifícios de cada tipologia esteja classificada com baixo risco específico, verifica-se que 22,4% dos edifícios se encontram em áreas de suscetibilidade elevada, sendo 14 de habitação (17,5% do total dos edifícios de habitação), 1 de indústria (100% do total dos edifícios de indústria) e 34 da categoria “outros” (25,6% do total dos edifícios classificados como “outros”).

No caso da rede viária (Figura 68) constata-se que 36% da extensão das vias de comunicação se encontra na classe de suscetibilidade mais elevada de rutura a deslizamentos, abrangendo 1,8 km de estradas principais (20% do total de estradas principais) e 8,6 km de estradas secundárias (42% do total de estradas secundárias). Na classe de suscetibilidade moderada à rutura a deslizamentos estão incluídos 1,4 km de estradas principais (16% do total de estradas principais) e 2,4 km de estradas secundárias (12% do total de estradas secundárias) (Figuras 69 e 70).

Face aos resultados obtidos do cruzamento dos elementos expostos com as classes de suscetibilidade à rutura de desabamentos e deslizamentos, seria importante ter em consideração as áreas de propagação em trabalhos futuros, com objetivo de melhorar a análise do risco, para efeitos de ordenamento do território e planeamento de emergência.

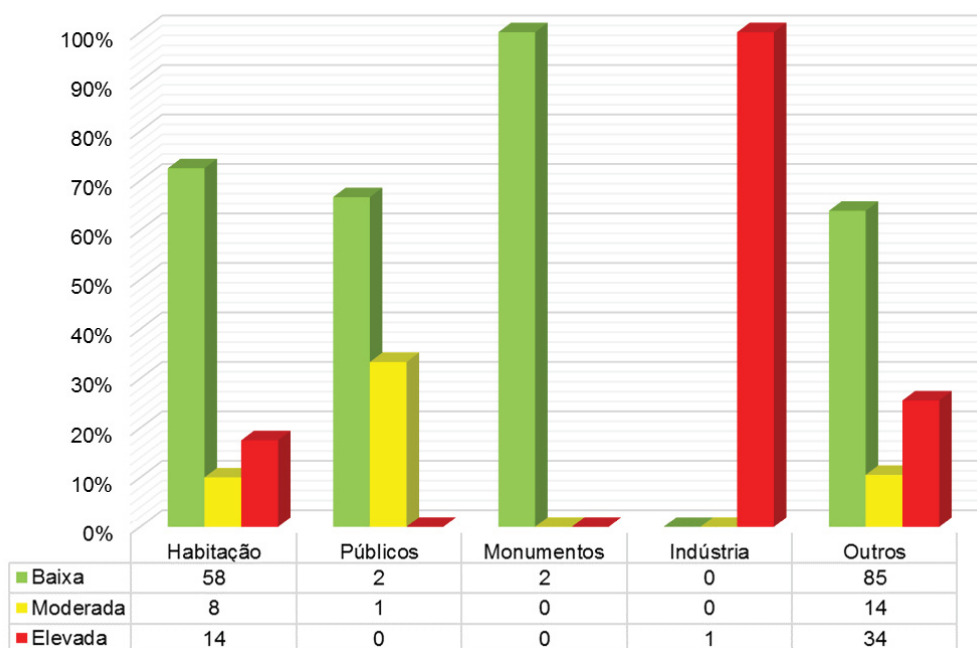


Figura 67 | Percentagem e número de edifícios por tipologia localizados em cada classe de suscetibilidade a deslizamentos.

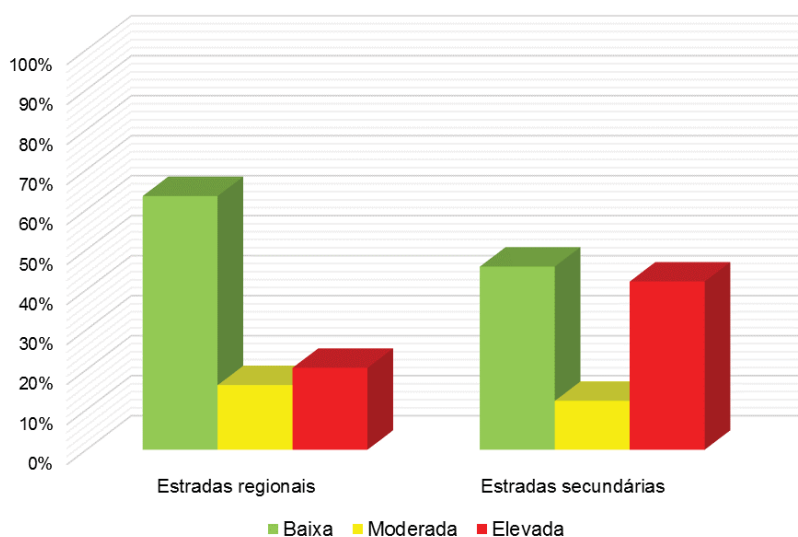


Figura 68 | Percentagem de vias de comunicação por tipologia localizados em cada classe de suscetibilidade a deslizamentos.

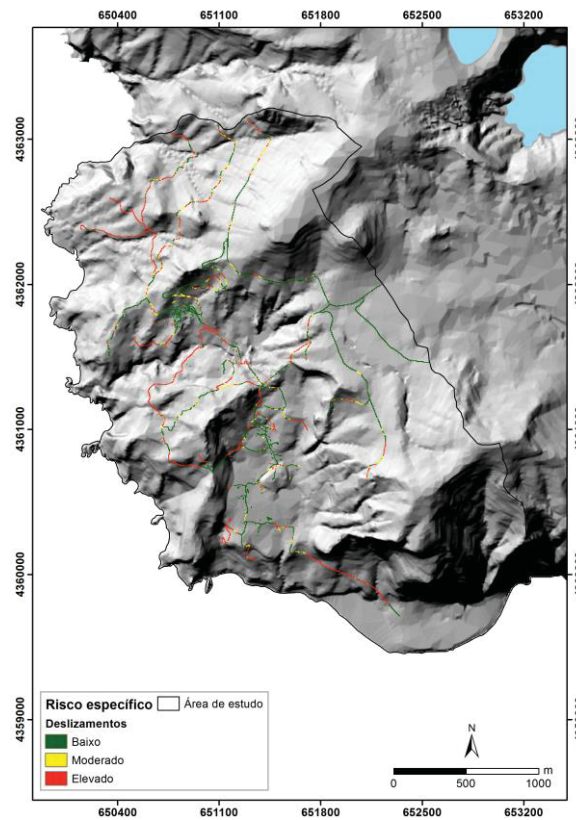


Figura 69 | Risco específico à rutura de deslizamentos dos elementos expostos na área de estudo.

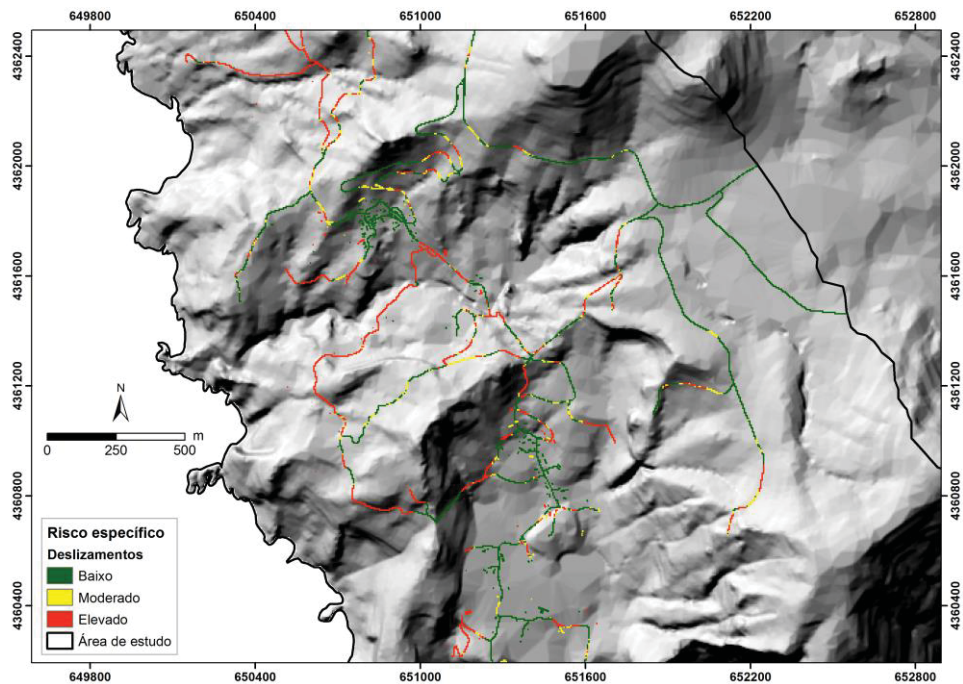


Figura 70 | Risco específico à rutura de deslizamentos dos elementos expostos na área de estudo (pormenor)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O recurso a linguagens de programação como uma ferramenta de trabalho é cada vez mais importante no quotidiano, seja para o desenvolvimento do conhecimento nas ciências e engenharias, seja ao nível das mais variadas áreas da indústria. A programação permite padronizar um conjunto de regras sintáticas e semânticas que definem sobre que dados um computador vai atuar, como é que estes são processados, armazenados ou difundidos e que ações devem ser tomadas sob várias circunstâncias.

A criação de um programa de computador permite executar de forma mais rápida tarefas repetitivas que de outra forma seriam morosas, e anular por completo a introdução de erros humanos, inerentes a processos de cálculo tradicionais. A criação e automatização de processos torna ainda possível analisar e avaliar a sensibilidade de algoritmos relativamente à introdução de diferentes dados de entrada, à alteração de parâmetros de modelação e à utilização de diferentes métodos. Este tipo de análise tende a criar uma quantidade muito elevada de resultados, que dificilmente poderiam ser produzidos e analisados através de procedimentos não automatizados.

O protótipo computacional, desenvolvido em linguagem MATLAB, denominado por *ALSA-Tools* (*Automatic Landslide Susceptibility Analysis Tools*), permitiu a análise e produção de cartografia automática da suscetibilidade a movimentos de vertente, com base no método estatístico bivariado Valor Informativo. O funcionamento do *ALSA-Tools* assenta em 5 *M-Files* principais: i) *Input Data.m*; ii) *Favorability.m*; iii) *Information Value.m*; iv) *Validation.m* e v) *Classification.m*. Estes têm em consideração as seguintes etapas fundamentais: i) inserção dos dados de entrada a utilizar na modelação; ii) desenvolvimento de modelos de suscetibilidade, incluindo o estudo da influência de diferentes fatores de predisposição e das suas combinações na qualidade dos modelos; iii) validação dos modelos; iv) produção dos mapas de suscetibilidade; e v) classificação do mapa de suscetibilidade final.

A área de estudo utilizada para testar o *ALSA-Tools* corresponde, *grosso modo*, à freguesia do Lajedo na ilha das Flores, um dos locais no arquipélago dos Açores recorrentemente afetado por fenómenos danosos de instabilidade geomorfológica e, por conseguinte, um local de excelência para o desenvolvimento de trabalhos de análise e avaliação do perigo de movimentos de vertente. Para a análise da suscetibilidade a movimentos de vertente foram identificadas e cartografadas, com base em trabalhos de campo e de gabinete, 474 áreas de rutura de movimentos de vertente, das quais 171 correspondem a desabamentos e 303 a

deslizamentos. Consideraram-se, ainda, no processo de análise 12 fatores de predisposição: altimetria, declive, exposição, perfil longitudinal da vertente, perfil transversal da vertente, insolação, área de contribuição, inverso do *wetness index*, distância aos cursos de água, densidade de drenagem, geologia e usos do solo.

O protótipo computacional desenvolvido permitiu compreender e quantificar os efeitos e a variabilidade de resultados da análise da suscetibilidade promovidos pela: i) discriminação (ou não) da tipologia de movimentos de vertente; ii) utilização de diferentes combinações de fatores de predisposição; e iii) incapacidade do território produzir condições únicas de terreno, a partir de determinado número de fatores de predisposição considerados nos modelos.

A capacidade de discriminar o território de cada fator de predisposição relativamente à propensão para a ocorrência de movimentos de vertente foi avaliada de forma individualizada, tendo permitido a sua hierarquização. Para tal foi utilizado como indicador a área abaixo da curva das curvas de sucesso, definidas utilizando a favorabilidade como medida para classificar o território. Esta análise possibilitou demonstrar que os fatores declive e geologia, independentemente da tipologia considerada, têm maior capacidade de discriminação espacial. No entanto, para os restantes fatores esta capacidade varia dependendo da tipologia de movimentos de vertente considerada. Tal atesta a necessidade de discriminar os movimentos de vertente por tipologia para efetuar corretamente a análise de suscetibilidade.

O *ALSA-Tools* permitiu aplicar o método Valor Informativo a todas as 4.095 combinações de fatores de predisposição possíveis para cada tipologia, o que de forma manual seria uma tarefa extremamente morosa e com um enorme potencial para gerar erros inerentes ao elevado número de operações que teriam de ser efetuadas. Assim, concluiu-se que, para a área de estudo, a melhor combinação para ambas as tipologias foi desenvolvida com sete fatores de predisposição: área de contribuição, densidade de drenagem, declive, exposição, geologia, insolação e uso do solo. Os modelos com melhor ajuste aos dados de entrada têm, no caso dos desabamentos, valor de área abaixo da curva da curva de sucesso igual a 0,95 e no caso dos deslizamentos, valor de área abaixo da curva da curva de sucesso igual a 0,84. Adicionalmente, verificou-se que este conjunto de fatores não é formado pelos sete fatores de predisposição que apresentam individualmente melhor capacidade de discriminar o território relativamente à suscetibilidade, mas sim por uma combinação de fatores que apresentam muita heterogeneidade relativamente a esta capacidade. Concluiu-se, desta forma, que a adição sucessiva de fatores de predisposição aos modelos, por ordem

decrecente da sua capacidade discriminatória, não garante que seja encontrada a melhor combinação de fatores para produzir o melhor modelo de suscetibilidade a movimentos de vertente.

Com o *ALSA-Tools* foi possível efetuar o estudo da variação dos valores de área abaixo da curva das curvas de sucesso e do número de condições únicas de terreno, observadas e esperadas, de acordo com o número de fatores predisposição que constituem cada modelo. Concluiu-se que o valor de área abaixo da curva de sucesso dos modelos, para as duas tipologias estudadas, tende a aumentar de forma não linear com o aumento do número de fatores de predisposição presentes nos modelos, tal como o número de condições únicas de terreno observadas. No entanto, relacionado com este incremento, observa-se uma diminuição na variabilidade e uma estagnação do melhor resultado obtido para os modelos com o mesmo número de fatores de predisposição. Tal permitiu demonstrar a incapacidade de o território gerar invariavelmente novas condições únicas de terreno com a sucessiva adição de fatores de predisposição, estando tal condicionalismo diretamente relacionado com a impossibilidade de sistematicamente melhorar a qualidade do ajuste dos modelos aos dados de entrada, com a adição de novos fatores de predisposição.

Os modelos com melhor qualidade para cada tipologia foram validados através da definição de curvas de predição e respetivas áreas abaixo da curva, tendo sido atestada a robustez estatística do inventário e a boa capacidade preditiva dos modelos. No caso dos desabamentos foi determinada um valor de área abaixo da curva de predição de 0,84 e para os deslizamentos de 0,79.

O mapa final de suscetibilidade a desabamentos mostra que as áreas de maior suscetibilidade estão localizadas em condições muito restritas da área de estudo, nomeadamente ao longo de arribas muito escarpadas, compostas por rochas muito fraturadas. No entanto, as áreas de maior suscetibilidade a deslizamentos ocupam áreas mais vastas, principalmente ao longo dos vales das linhas de água e de outras encostas íngremes, compostas por materiais mais antigos e muito alterados.

No quadro legislativo português, os riscos encontram-se dispersos em várias leis, criando sobreposições e ineficácia na sua gestão e prevenção. Verificam-se diferenças, por vezes contraditórias, na terminologia e conceitos associados aos riscos, em muito devido à utilização errada dos conceitos de “risco” e “perigo”. A análise realizada aos Instrumentos de Gestão Territorial permite concluir que a maioria releva a importância da avaliação dos riscos naturais, sem, no entanto, incluir qualquer cartografia de suscetibilidade, perigosidade ou risco que delimite áreas com maior ou menor propensão para a ocorrência deste tipo de fenómenos. Como tal, os estudos de caracterização do território e a identificação e análise do risco são

componentes importantes a ter em conta na elaboração e revisão de políticas de ordenamento do território e de proteção civil, salvaguardando sempre a articulação entre os demais planos existentes.

Neste sentido, a sobreposição dos mapas de suscetibilidade desenvolvidos neste trabalho com a localização dos elementos expostos, que permitiu obter o risco específico, mostra que a grande generalidade dos elementos existentes na área, se encontra em áreas de suscetibilidade baixa. No caso particular da suscetibilidade à rutura de desabamentos, conclui-se que nenhum edifício está localizado em zonas de suscetibilidade elevada e que as vias de comunicação apresentam 1,7% da sua extensão localizada em áreas de suscetibilidade elevada. Por outro lado, decorrente da avaliação do risco específico à rutura de deslizamentos, verifica-se que 22,4% dos edifícios se encontram em áreas de suscetibilidade elevada e que 36,0% da extensão da rede viária se encontra na classe de suscetibilidade mais elevada, abrangendo 1,7 km de estradas principais e 8,5 km de estradas secundárias.

Os resultados e conclusões obtidos neste trabalho, além da utilidade prática que podem ter na área de estudo para a implementação e atualização de políticas públicas de ordenamento do território e planeamento de emergência, são importantes para compreender a dinâmica e a variabilidade de resultados inerentes à utilização de métodos estatísticos e probabilísticos na análise da suscetibilidade a movimentos de vertente.

BIBLIOGRAFIA

Aleotti, P. e Chowdhury, R. (1999) - Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 58: 21-44.

Amaral, P. (2010) – *Caracterização geotécnica e hidrológica de depósitos vulcânicos: modelação da estabilidade de taludes no concelho da Povoação (Ilha de S. Miguel - Açores)*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 277 p.

Amaral, P.; Marques, R.; Zêzere, J.L.; Queiroz, G. e Marques, F. (2009) - Aplicação de um modelo hidrológico e geotécnico à instabilidade de vertentes desencadeada por precipitação intensa no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. VI: 133-138.

Azevedo J.M. e Portugal Ferreira, M.R. (1996) - Flores Island, Azores: volcanic gaps and subaerial records of marine activity. *Comunicação à Seventh General Assembly of the WEGENER*. WEGENER 96, Vila Nova de Gaia, Portugal.

Azevedo J.M. e Portugal Ferreira, M.R. (2006) - The volcanotectonic evolution of Flores Island, Azores (Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 156(1):90-102.

Azevedo, J.M. (1999) - *Geologia e hidrogeologia da ilha das Flores, Açores*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.

Azevedo, J.M.; Portugal Ferreira M.R. e Martins, J.A. (1986) - O complexo de base da ilha das Flores, Açores. *Memórias e Notícias*. Publ. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra. 101: 56- 71.

Baeza, C. e Corominas, J. (2001) - Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*. 26: 1251-1263.

Bisci, C.; Dramis, F. e Sorriso-Valvo, M. (1996) - Rock flow. *In: Dikau, R.; Brunsen, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. (Eds.), Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Chichester. 150-160.

Blahut, J.; van Westen, C.J. e Sterlacchini, S. (2010) – Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*. 119: 36–51.

Borges, P.; Andrade, C.; Freitas, M.C. Tsunamis históricos na ilha do Faial (Açores – Portugal). *In: Oliveira, C.S., Costa, A., Nunes, J.C. (Eds.), Sismo 1998 – Açores. Uma década depois, 2008, SPRIH, 707-716.*

Camões, J.A. (1822) - Relatório das Cousas mais Notáveis que Havião nas Ilhas Flores e Corvo, por um Indivíduo que Nelas se Achava, e Enviado ao Capitão General. *In: Leite, J.G.R., Um retrato da Ilha das Flores no final do antigo regime - a Memória do padre José António Camões, Boletim do Instituto Histórico da Ilha Terceira, vol. XLVIII (43) - 1990; IHIT, Angra do Heroísmo, 1993.*

Carvalho, J. (2009) - *Matriz para a estruturação do território*. 2º Congresso Lusófono de Ciência Regional.1–30.

Chapman, S.J. (2008) - *MATLAB Programming for Engineers*. Fourth Edition. Thomson-Engineering.

Chung, C.-J.F. e Fabbri, A.G. (1999) - Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 65(12): 1389–1399.

Chung, C.-J.F. e Fabbri, A.G. (2003) – Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*. 30: 451–472.

Corominas, J.; Remondo, J.; Farias, P.; Estevão, M.; Zêzere, J.L.; Dias de Teran, J.; Dikau, R.; Schrott, L.; Moya, J. e Gonzalez, A. (1996) - Debris flow. *In: Dikau, R., Brundsen, D. e Schrott, L. (Eds.), Landslide Recognition*. Wiley, New York. 161–180.

Crozier, M.J. e Glade, T. (2005) - Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. *In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (Eds.), Landslide risk assessment*. John Wiley. 1-40.

Cruden, D.M. (1991) – A simple definition of landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 43: 27-29.

Cruden, D.M. e Varnes, D.J. (1996) – Landslides types and processes. *In: Turner, A. K. e Schuster, R.L. (Eds.), Landslides investigation and mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board. National Research Council. 36-75.

Decreto Legislativo Regional n.º 19/2003/A, de 23 de abril, aprova o Plano Regional da Água.

Decreto Legislativo Regional n.º 19/2015/A, de 14 de agosto, aprova o Plano Sectorial de Ordenamento do Território para as Atividades Extrativas da Região Autónoma dos Açores.

Decreto Legislativo Regional n.º 1-A/2017/A, de 6 de fevereiro, aprova o Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores 2016-2021.

Decreto Legislativo Regional n.º 20/2006/A, de 6 de junho, aprova o Plano Sectorial da Rede Natura 2000 da Região Autónoma dos Açores.

Decreto Legislativo Regional n.º 20/2016/A, de 10 de outubro, aprova o Plano de Gestão de Riscos de Inundações da Região Autónoma dos Açores.

Decreto Legislativo Regional n.º 26/2010/A, de 12 de agosto, aprova o Plano Regional de Ordenamento do Território dos Açores.

Decreto Legislativo Regional n.º 38/2008/A, de 11 de agosto, aprova o Plano de Ordenamento Turístico da Região Autónoma dos Açores.

Decreto Legislativo Regional n.º 6/2016/A, de 29 de março, aprova o Plano Estratégico de Prevenção e Gestão de Resíduos dos Açores.

Decreto Regulamentar Regional n.º 24/2008/A, de 26 de novembro, aprova o Plano de Ordenamento da Orla Costeira da ilha das Flores.

Decreto Regulamentar Regional n.º 3/2007/A, de 2 de fevereiro, ratifica o Plano Diretor Municipal das Lajes das Flores.

Dietrich, E.W.; Reiss, R.; Hsu, M-L. e Montgomery, D.R. (1995) - A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Process*. 9: 383-400.

Dikau, R.; Brundsen, D.; Schrott, L. e Ibsen, M.L. (1996) – *Landslide Recognition – identification, movement and causes*. John Wiley and Sons. Chichester. 251 p.

Drummond, F.F. (1856) - *Anais da Ilha Terceira*. Secretaria Regional da Educação e Cultura (Ed.), Angra do Heroísmo, 1981, vol. II, 241 (versão fac-similada).

DTDC-SRHE (Divisão de Topografia, Desenho e Cartografia da Secretaria Regional da Habitação e Equipamentos) (2009) - Cartografia da ilha das Flores, Açores. Escala 1:5.000. Produzida pela empresa Geometral.

Fabbri, A.G.; Chung, C.F.; Napolitano, P.; Remondo, J. e Zêzere, J.L. (2002) – Prediction rate functions of landslide susceptibility applied in the Iberian Peninsula. *Risk Analysis III*: 703 - 718. fac-similada).

Felicísimo, A.; Cuatero, A.; Remondo, J. e Quirós, E. (2013) - Mapping landslide susceptibility with MLR, MARS, CART and MAXENT methods: A comparative study. *Landslides*. 10: 175–189.

Flageollet, J.-C. (1989) - *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Masson, Paris. 224 p.

Garcia, R.A.C. (2002) – *Avaliação do risco de movimentos de vertente na Depressão da Abadia (Torres Vedras)*. Tese de Mestrado em Geografia Física e Ambiente. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. 140 p.

Garcia, R.A.C. (2012) – *Metodologias de Avaliação da Perigosidade e Risco associado a movimentos de vertente. Aplicação na bacia do rio Alenquer*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física apresentada ao Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa. 437 p.

Garcia, R.A.C.; Zêzere, J.L. e Oliveira, S.C. (2007) – A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a movimentos de vertente. *Dinâmicas geomorfológicas. Metodologias. Aplicação*. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos. Lisboa. V: 265–279.

Gaspar, J. (2005) - *Conceito de ordenamento do território*. Grupo Ordenamento do Território. 1–15.

Gaspar, J.L., Queiroz, G., Ferreira, T., Medeiros, A.R. e Goulart, C. (2015) - Earthquakes and volcanic eruptions in the Azores Region: geodynamic implications from major historical events and instrumental seismicity. In: Gaspar, J.L., Guest, J., Duncan, A., Chester, D. e Barriga, F. (Eds.), *Volcanic Geology of S. Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir. 44(1):33-49.

Gaspar, J.L.; Trota, A.; Azevedo, J.M. e Queiroz, G. (1999) - *Plano Municipal de Emergência concelho de Santa Cruz das Flores*.

Glade, T. e Crozier, M.J. (2005) – The nature of landslide impact. In: Glade, T.; Anderson, M. e Crozier, M. (Eds.), *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester. 43-74.

Gomes, A. (2003) – *Contribuição para o estudo dos riscos geológicos no Vulcão das Sete Cidades (S. Miguel, Açores)*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 129 p.

Gordo, C. (2017) - *Modelação da Suscetibilidade à Ruptura de Movimentos de Vertente, Ilha de São Miguel, Açores*. Tese de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa. 125 p.

Goulart, C. (2004) – *Aplicação de sistemas de informação geográfica análise de riscos geológicos*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 119 p.

Guzzetti, F. (2005) – *Landslide hazard and risk assessment – concepts, methods and tools for the detection and mapping of landslides, for landslides susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation*. Dissertação de Doutoramento apresentada à Mathematchinaturwissenschaftlichen Fakultät da Rheinischen Friedrich-Wilhelms, Universidade de Bona.

Guzzetti, F.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. e Carrara, A. (2000) – Comparing landslide maps: A case study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy. *Environmental Management*. 25(3): 247-263.

Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M. e Reichenbach, P. (1999) – Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*. 31: 181–216.

Guzzetti, F.; Galli, M.; Reichenbach, P.; Ardizzone, F. e Cardinali, M. (2006) – Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 6: 115–131.

Hahn, B. e Valentine, D. (2013) - *Essential MATLAB for Engineers and Scientists*. Fifth Edition. Oxford: Elsevier.

Highland, L.M. e Bobrowsky, P. (2008) - *The landslide handbook - A guide to understanding landslides*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia Circular. 1325, 129 p.

Hipólito, A. (2009) - *Geologia Estrutural da Ilha Graciosa: Enquadramento no âmbito da junção tripla dos Açores*. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia e Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 155 pp.

Hutchinson, J.N. (1968) - Mass movement. In: Fairbridge, R. W. (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*. Reinhold. New York. 688-695.

Hutchinson, J.N. (1988) - General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: Bonnard, C. (Ed.), *Landslides, Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*. Lausanne. Balkema, Rotterdam. 1: 3-35.

IGeoE (Instituto Geográfico do Exército) (2000) – *Cartografia da ilha das Flores (Açores)*. Escala 1:25.000.

Lameiras, E. (2006) – *Avaliação do impacte do terramoto de 1998 na Ilha Faial*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 168 p.

Lei n.º 58/2007, de 4 de setembro, aprova o Programa Nacional de Política de Ordenamento do Território.

Leroi, E. (1996) - Landslide hazard - risk maps at different scales: objectives, tools and developments. *In: Senneset, K. (Ed.), Landslides, Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides*, Honolulu, Balkema, Rotterdam. 35-51.

Macedo, A.L.S. (1871) - *História das quatro ilhas que formam o Distrito da Horta*. Ed. Secretaria Regional da Educação e Cultura, Direcção Geral dos Assuntos Culturais, 1981, Vol. I, 273, 283 e III, 120-121 (versão fac-similada).

Malamud, B.D.; Turcotte, D.L.; Guzzetti, F. e Reichenbach, P. (2004) – Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface processes and Landforms*. 29: 687 – 711.

Marques, R. (2013) - *Estudo de Movimentos de Vertente no Concelho da Povoação (Ilha de São Miguel Açores): Inventariação, Caracterização e Análise da Susceptibilidade*. Tese de Doutoramento, Universidade dos Açores.

Marques, R.; Amaral, P.; Araújo, I.; Gaspar, J.L. e Zêzere, J.L. (2015) – Landslides in S. Miguel (Azores): susceptibility analysis and validation of rupture zones using a bivariate GIS-based statistical approach. *In: Gaspar, J.L.; Guest, J.E.; Duncan, A.M.; Chester, D. e Barriga, F. (Eds.), Volcanic Geology of S. Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir. 44(1): 167-184.

Marques, R.; Amaral, P.; Zêzere, J.L.; Queiroz, G. e Goulart, C. (2009) - Estudo comparativo de diferentes métodos probabilísticos para a avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente: um caso de estudo no Vale da Ribeira Quente (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. VI: 183-190.

Marques, R.; Zêzere, J.L.; Queiroz, G. e Coutinho, R. (2007) – Actividade geomorfológica desencadeada pela crise sísmica de 2005 no Vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores): avaliação da susceptibilidade com recurso a regressão logística. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. Vol. V: 47-61.

Medeiros, J. (2004) – *Contribuição para o estudo dos riscos geológicos no Concelho de Vila Franca do Campo (S. Miguel, Açores) e suas implicações em termos de planeamento de emergência*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 145 p.

Miguel, A. (2016) - *Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente na zona oeste da ilha Terceira*. Tese de Doutoramento em Gestão Interdisciplinar da Paisagem. Universidade dos Açores. 299 p.

Needham, H. e Francheteau, J. (1974) - Some characteristics of the rift valley in the Atlantic Ocean near 36°48' north. *Earth and Planetary Science Letters*. 22: 29-43.

Oliveira, S.C.; Rocha, J.; Zêzere, J.L.; Garcia, R.A.C. e Piedade, A. (2009) – Avaliação da suscetibilidade a deslizamentos rotacionais através da aplicação de métodos estatísticos. *Actas da VI Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*. Cartografia e Geodesia 2009. Lidel, Lisboa. 530-539.

Pacheco, J.; Coutinho, R.; Wallenstein, N.; Pimentel, A.; Marques, R. e Silva, R. (2006) - *POOC Flores – Plano de Ordenamento da Orla Costeira da Ilha das Flores - 1ª Fase – Caracterização e diagnóstico*. Gestão Sustentável do Desenvolvimento Social, Económico e Ecológico das Áreas Litorais da Macaronésia, iniciativa Comunitária INTERREG III B 2000-2006. 402 p.

Papadopoulos, G. A. e Imamura, F. (2001) – A Proposal for a new tsunami intensity scale. *In: Proceedings ITS*. 5: 569-577.

Pereira, M. (2009) - Desafios contemporâneos do ordenamento do território: para uma governabilidade inteligente do(s) território(s). *Prospectiva e Planeamento*. 16: 78–102.

Pereira, S. (2009) – *Perigosidade a movimentos de vertente na Região Norte de Portugal*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física. Faculdade de Letras da Universidade do Porto. 370p.

Piedade, A.; Zêzere, J.L.; Garcia, R.A.C. e Oliveira, S.C. (2010) - Análise sensitiva dos factores de predisposição à instabilidade geomorfológica na área a norte de Lisboa. *In: Bateira, C.; Soares, L.; Gomes, A.; Chaminé, H.I. (Eds.), Volume de Actas do V Congresso Nacional de Geomorfologia*. Porto, 59–63.

Popescu, M.E. (1994) – A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de L'ingénieur*. 50: 71 – 74.

Resendes, J. (2004) – *Contribuição para o estudo dos riscos geológicos no Concelho da Povoação (S. Miguel, Açores) e suas implicações em termos de planeamento de emergência*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 149 p.

Schuster, R.L. (1996) – Socioeconomic significance of landslides. *In: Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Eds.), Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board. National Academic Press, Washington D. C. Special Report. 247: 12 – 35.

Schuster, R.L.; Highland, L. M., R. A. (2001) – *Socioeconomic and environmental impacts of landslides*. Open-file report 01-0276. USGS – Science for a changing world. Denver.

Silva R.F.; Marques R. e Gaspar J.L. (2018) - Implications of Landslide Typology and Predisposing Factor Combinations for Probabilistic Landslide Susceptibility Models: A Case Study in Lajedo Parish (Flores Island, Azores—Portugal). *Geosciences*, 8(5):153.

Silva, R.F.; Marques, R. e Gaspar, J.L. (2017) - Avaliação da importância da discriminação de movimentos de vertente por tipologia e análise sensitiva de modelos de suscetibilidade: um caso de estudo na freguesia do Lajedo (ilha das Flores, Açores). *In: Gomes, A.; Teixeira, S.; Soares, L. (Comissão Redatorial) Geomorfologia 2017. Atas do VIII Congresso Nacional de Geomorfologia*. Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Porto. p. 91-94.

Silveira, J.A. (1848-1849). Anais do Município das Lajes das Flores, 1970, edição própria, p.58, (continuado pelo Padre João Augusto da Silveira e anotados por Pedro da Silveira e Jacob Tomaz).

Soeters, R. e van Westen, C.L. (1996) – Slope instability recognition, analysis, and zonation. *In: Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Eds.), Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board. National Academic Press, Washington D C. Special Report. 247: 129 – 177.

Sommerville, I. (2010) - *Software Engineering*. 9th Edition. Boston, Ma. Addison-Wesley.

SRAM (2007) - *Carta de ocupação do solo da região autónoma dos Açores nº8 – Ilha das Flores*. Escala 1:50.000. Secretaria Regional do Ambiente e do Mar.

Steger, S., e Glade, T. (2017) - The Challenge of “Trivial Areas” in Statistical Landslide Susceptibility Modelling. *In Workshop on World Landslide Forum. Advancing Culture of Living with Landslides*. 803-808.

Steger, S.; Brenning, A.; Bell, R. e Glade, T. (2016) - The impact of systematically incomplete and positionally inaccurate landslide inventories on statistical landslide susceptibility models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 16: 2729–2745.

Tarboton, T.; Sazib, N. e Dash, P. (2015) - *TauDEM 5.3 – Quick Start Guide to Using the TauDEM ArcGis Toolbox*.

Teles, V. (2010) - *A (In)consciência dos Riscos Naturais em meio urbano. Estudo de caso: o risco de inundação no concelho de Braga*. Universidade do Minho, Instituto de Ciências Sociais, 312 p.

Thierry, Y.; Malet, J.P.; Sterlacchini, S.; Puissant, A. e Maquaire, O. (2007) – Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to complex mountainous environment. *Geomorphology*. 92: 38 – 59.

van Westen C.J.; Castellanos, E. e Kuriakose, S. L. (2008) - Spatial data for landslide susceptibility, hazards, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology*. 102: 112 – 131.

Varnes, D.J. e International Association of Engineering Geology – Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes (1984) – *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. UNESCO, Paris.

Varnes, D.J. (1978) – *Slope movement and types and processes. Landslides: analysis and control*. Transportation Research Board. National Academy of Sciences. Washington D.C..11-33.

Vasconcelos, J. e Reis, L. (2002) - *Programação I – Introdução à Algoritmia e Estruturas de Dados*. Universidade Fernando Pessoa.

Vasconcelos, J. e Carvalho, J. (2005) - *Algoritmia e Estrutura de Dados: programação nas linguagens C e Java*. Editora Centro Atlântico.

WP/WLI - Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993a) – A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Paris. 47: 53-57.

WP/WLI - Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993b) – *Multilingual landslide glossary*. International Geotechnical Societies. Canadian Geotechnical Society. Richmond.

Yin, K. e Yan, T. (1988) - Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In: Bonnard, C. (ed.) *Landslides, Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*. Balkema, Rotterdam, 1269–1272.

Zbyskewski, G.; Medeiros, A.C.; Ferreira O.V. e Assunção, C.T. (1968) - *Carta Geológica de Portugal na escala de 1:25.000. Notícia explicativa da folha da ilha das Flores*. Serv. Geol. Portugal, Lisboa. 31 p.

Zêzere, J.L. (1997) – *Movimentos de vertente e perigosidade geomorfológica na Região Norte de Lisboa*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. 575 p.

Zêzere, J.L. (2000) – *A classificação de movimentos de vertente: tipologia, actividade e morfologia*. *Apontamentos de Geografia – série de investigação*, Centro de Estudos Geográficos, nº6, 34 p.

Zêzere, J.L. (2005) – *Dinâmica de vertentes e risco geomorfológicos (Programa)*. Centro de Estudos Geográficos. Área de Geografia Física e Ambiente. 41. Lisboa.

Zêzere, J.L. (2010) – *Relatório do programa de Perigosidade, Vulnerabilidade e Riscos no Território: aplicação aos movimentos de vertente*. Provas de Agregação. Universidade de Lisboa.

Zêzere, J.L.; Garcia, R.A.C.; Oliveira, S.C. e Reis, E. (2008) – Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*. 94: 467-495.

Zêzere, J.L.; Pereira, S.; Melo, R.; Oliveira, S.C. e Garcia, R.A.C. (2017) - Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. *Science of the Total Environment*. 589: 250–267.

Zêzere, J.L.; Reis, R.; Garcia, R.A.C.; Oliveira, S.C.; Rodrigues, M.L. e Ferreira, A.B. (2004) – Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 4(1): 133 – 146.

UNIVERSIDADE DOS AÇORES
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Rua da Mãe de Deus
9500-321 Ponta Delgada
Açores, Portugal



DM

Protótipo para análise automática da suscetibilidade a movimentos de vertente

Rui Filipe Fagundes Silva

2018