

Carlos Manuel Fernandes Gonçalves

2º Ciclo de Estudos em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território

Modelação e validação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos no concelho de
Castelo de Paiva

2014

Orientador: Professor Doutor Carlos Valdir de Meneses Bateira

Classificação: Ciclo de estudos:

Dissertação:

Versão definitiva

Agradecimentos

A dissertação de mestrado que se apresenta reflete a minha entrega, o meu empenho e aprendizagem juntamente com a colaboração de diversas pessoas e entidades, que ao longo deste percurso, contribuíram para a evolução deste projeto de investigação e para o enriquecimento da minha experiência pessoal e académica.

A realização desta dissertação marca uma importante etapa da minha vida. Gostaria de agradecer e reconhecer publicamente a todos os que de forma direta ou indireta contribuíram e cooperaram de forma determinante para a sua concretização e definiram os meus interesses de investigação. Desta forma o trabalho apresentado obteve diversos contributos de instituições e de pessoas que foram decisivos para a conclusão da investigação e que importa referir e agradecer.

Ao professor doutor Carlos Valdir de Meneses Bateira, o meu orientador, por todo o apoio e disponibilidade demonstrados ao longo da dissertação, pelo seu interesse na cartografia de suscetibilidade e da dinâmica de vertentes, por sugestões de leitura de artigos e documentos sobre o tema. A sua dedicação e entrega, a capacidade de transmissão de conhecimento, de orientação e de estruturação de objetivos e por toda a ajuda no tratamento estatístico desta dissertação. Ao apoio na realização do inventário de desabamentos, na recolha e organização das ocorrências na base de dados, no meu acompanhamento no trabalho de campo, mas também o seu sentido crítico de análise dos resultados foram decisivas para a realização deste trabalho, que veio a revelar-se fundamental numa parte significativa desta dissertação.

À autarquia de Castelo de Paiva, um agradecimento pela cedência de informação geográfica, da altimetria, planimetria e ortofotomapas do concelho, que serviu de suporte à investigação. Sem esta informação não seria possível realizar a base de dados e a cartografia da suscetibilidade à rotura de desabamentos no concelho.

Às equipas da Faculdade de Letras da Universidade do Porto, pelo apoio e disponibilidade, em particular ao professor António Gomes e também pelos incentivos à participação em congressos, colóquios e simpósios sobre o tema e pelo meu acompanhamento no trabalho de campo.

A todos os meus amigos, em particular ao Rui Manuel Martins Gomes por toda a partilha de informação, num espírito de entreajuda e partilha.

Resumo

No presente trabalho foi desenvolvida uma investigação relacionada com a instabilidade de vertentes. Este projeto de investigação tem como objetivo principal o desenvolvimento e a aplicação de um conjunto de metodologias que possibilitem investigar o conhecimento acerca da instabilidade de vertentes. O concelho de Castelo de Paiva com 115,04 km², foi definida como área de estudo por apresentar, condições muito favoráveis em termos de propensão natural para a ocorrência de queda de blocos.

A avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos baseou-se no inventário de fontes de desabamentos que foram georreferenciados num SIG, na identificação e ponderação da cartografia dos fatores de predisposição mais importantes da escala de análise adotada, na metodologia de zonamento da suscetibilidade, nas informações disponíveis e com base na unidade cartográfica de representação de pixéis de 5m.

Na área de estudo aplicou-se uma análise estatística bivariada, com base no método do Valor Informativo. Os resultados do zonamento da suscetibilidade a queda de blocos rochosos foram validados com base numa partição aleatória das fontes de desabamentos, no cálculo das taxas de sucesso e na taxa de predição dos modelos. Foi realizada uma análise sensitiva, tendo em consideração, o peso de cada variável independente que possui na avaliação da suscetibilidade.

Como principais resultados na avaliação da suscetibilidade, apontam-se a inventariação de 166 abruptos rochosos que poderão originar queda de blocos, muito favorecidos com declives muito acentuados e uma litologia com um predomínio de quartzitos e granitos.

Na aplicação do método do valor informativo foram construídos 6 modelos de suscetibilidade à ocorrência de desabamentos e obtiveram-se resultados bastante satisfatórios na validação de cada modelo, através das taxas de sucesso e predição.

Com este estudo, foi possível o desenvolvimento de novas competências ligadas à avaliação da suscetibilidade e ao conhecimento da área de estudo.

Palavras-chave: Castelo de Paiva; Inventário; Desabamentos; Modelação; Suscetibilidade.

Abstract

On the following report was developed an investigation related to the hillsides instability. This investigation project has as the main objective the development and the application of a set of methodologies that allow investigating the knowledge about the hillsides instability. The 115, 04 km² Castelo de Paiva's municipality was defined has a study area because it presents very favorable conditions in terms of a natural propensity to the occurrence of rock fall.

The evaluation of susceptibility to occur landslides was based on a landslides sources inventory that had been geo referenced on a Geographical Information System, on the identification and ponderation of the cartography of the most important predisposition factors of the adopted analysis scale, on the susceptibility zoning methodology, on the available information and based on the representation cartographical unit of 5m pixels.

On the studied area was applied a bi varied statistical analysis, based on the Informative Value method. The susceptibility of rocky blocks lands sliding zoning results were validated by a random partition of landslides sources, by the success rates calculus, models prediction rates. It was performed a sensitive analysis, considering each independent variable weight on the susceptibility evaluation.

As the main results of the susceptibility evaluation were the inventorying of 166 rocky steep slopes that may origin block's landslides, very favored with very steep slopes and a lithology formed mostly by quartz and granite.

When applying the informative value method were built six models for susceptibility to landslides occurrences and were obtained very satisfying results on the validation of each model, through success and prediction rates.

With this study, it was possible to develop new aptitudes linked to susceptibility evaluation and the area of study knowledge.

Keywords: Castelo de Paiva; Inventory; fall; Modelling; Susceptibility.

Acrónimos e abreviaturas

AAC	Área Abaixo da Curva
COS	Carta de Ocupação do Solo
CURV	Curvatura
CXG	Complexo xisto grauváquico
D	Declive (em graus)
DGT	Direção Geral do Território
EXP	Exposições (em graus)
G1	Grupo 1
G2	Grupo 2
GTF	Grupo total de fontes
IGP	Instituto Geográfico Português
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
MDT	Modelos Digitais de Terreno
REN	Reserva Ecológica Nacional
SCDB	Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão
TIN	Triangular Irregular Network
UL	Unidade Litológica
UOS	Unidades de ocupação do solo
VI	Valor Informativo
WP/WLI	Working Party on the World Landslide Inventory

Índice

Agradecimentos	I
Resumo.....	II
Abstract	III
Acrónimos e abreviaturas	IV
Índice de Figuras	VII
Índice de Tabelas	IX
Índice de Gráficos.....	X
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Enquadramento ao tema.....	1
1.2 - Objetivos	2
1.3 - Estrutura da dissertação	2
1.4 - Metodologia geral seguida na Investigação	4
1.5 - Justificação da escolha da área de estudo	6
1.6 - Enquadramento físico do concelho de Castelo de Paiva	7
1.6.1 - Enquadramento geográfico.....	7
1.6.2 - Caraterização geológica e estruturas tectónicas	8
1.6.3 - Caraterização geomorfológica.....	13
Capítulo 2 - Movimentos de vertente.....	17
2.1 - Tipologia de movimentos de vertente	18
Capítulo 3-Metodologias	23
3.1 - Métodos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente	23
3.2 - Elaboração da Base de dados geográficos	30
3.3 - Elaboração do inventário de desabamentos	31
3.4 - Bases cartográficas e processamento das variáveis utilizadas na modelação	40
3.4.1 - Variável dependente.....	43
3.4.2 - Variáveis independentes.....	44
Capítulo 4 - Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos no concelho de Castelo de Paiva.....	52
4.1 - Fatores de predisposição.....	53
4.2 - Modelação da suscetibilidade a desabamentos	56
4.3 - Validação da suscetibilidade a desabamentos.....	60
4.4 - Cartografia de suscetibilidade à ocorrência de desabamentos	69

4.5 - Análise sensitiva dos fatores de pré-disposição da suscetibilidade	80
4.6 - Discussão dos resultados	87
Capítulo 5 - Conclusões	89
Referências bibliográficas	92

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema metodológico aplicado ao desenvolvimento da investigação	5
Figura 2 - Enquadramento geográfico de Castelo de Paiva	8
Figura 3 - Esboço litológico da região de Castelo de Paiva - Castro Daire (Rebello, 1984).5. Depósitos de cobertura (Plio-Quaternário), 4. Rochas metassedimentares (Paleozóico médio- superior); 3. Quartzito Armoricano; 2. Rochas metassedimentares (Proterozóico superior e/ou Câmbrico); 1. Granitóides (variscos); F- Falha; C - Vale de fratura; a – Sede de Concelho, b – Outras povoações, c- Marcos geodésicos)	9
Figura 4 - Geologia do concelho, adaptado e revisto de (Medeiros et al, 1964).....	10
Figura 5 - Altimetria do concelho de Castelo de Paiva.....	13
Figura 6 - Unidade geomorfológicas principais em Castelo de Paiva	14
Figura 7 - Abruptos rochosos. A) Alto de S. Adrião (647m). B) Alto de S. Domingos (423m). C) Alto de Pedorido (250m). D) Alto de S. Gens (329m).	15
Figura 8 - Esquema do Desabamento adaptado de Cruden e Varnes (1996).....	18
Figura 9 - Modo de deslocação de materiais rochosos em função do declive da vertente abaixo das áreas de rutura (adaptado de Ritchie, 1963 in Dorren, 2003);	19
Figura 10 - Desabamento com aprisionamento de blocos pela vegetação na base do afloramento quartzítico. (A) Alto de S. Domingos. (B) Alto de Pedorido.....	20
Figura 11 - Balançamento de Cruden e Varnes (1996) adaptado por Highland e Bobrowsky (2008)	20
Figura 12 - (A) Deslizamento simples. (B) múltiplo. (C) sucessivo. (adaptado de Hutchinson, 1988) (D) Deslizamento rotacional de Cruden e Varnes (1996).....	21
Figura 13 - Deslizamento translacional de Cruden e Varnes (1996)	21
Figura 14 - Esquema da expansão lateral de Cruden e Varnes (1996)	22
Figura 15 - Esquema de fluxo ou escoada de Cruden e Varnes (1996)	22
Figura 16 - Esquema metodológico na elaboração da base de dados geográfica	31
Figura 17 - Ficha de inventário utilizada em trabalho de campo	33
Figura 18 - Extrato da Base de Dados de fontes de desabamentos da área de estudo	34
Figura 19 - Procedimentos na fotointerpretação das fontes de desabamentos.....	35
Figura 20 - Delimitações efetuadas. A) e C) Abrupto rochoso vetorizado por fotointerpretação, B) e D) Abruptos rochosos no Alto de S. Domingos.	37
Figura 21 - Trabalho de campo.A) Alto de S. Domingos. B) Elevações em Pedorido. C e D) Alto de S. Gens.....	38

Figura 22 - Afloramentos rochosos de quartzitos. A) Alto de Pedorido. B) Alto de S. Domingos	39
Figura 23 - Inventário com a totalidade das 166 fontes de desabamentos identificados a partir da interpretação de ortofotomapas e trabalho de campo.....	40
Figura 24 - Esquema metodológico praticado no pré-processamento das variáveis utilizadas na modelação e projeto SIG delimitadas à área de estudo	43
Figura 25 - Conversão de fontes de desabamentos em talude de estrutura vetorial (polígonos a amarelo).....	44
Figura 26 - Esquema metodológico na construção do MDT e informação derivada para representação da área de estudo. A) Curvas de nível. B) Pontos cotados. C) Limite de estudo. D) Rede irregular de triângulos. E) Formato matricial 5x5m. F) Formato matricial 20x20m. G) Exposições 5x5m. H) Declives 5x5m. I) Hipsometria. J) Sombreamento das vertentes. L) Curvaturas das vertentes 20x20m. M) Curvatura das vertentes 5x5m.....	45
Figura 27 - Declives em graus do concelho de Castelo de Paiva.....	46
Figura 28 - Exposições das vertentes do Concelho de Castelo de Paiva	47
Figura 29 - Curvatura das vertentes do concelho de Castelo de Paiva	48
Figura 30 - Unidades de ocupação do solo no concelho de Castelo de Paiva.....	49
Figura 31 - Unidades de litologia do concelho de Castelo de Paiva	50
Figura 32 - Esquema metodológico de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos	52
Figura 33 - Sobreposição das fontes de desabamentos nas classes de territórios artificializados com as florestas representadas no nível II da cartografia COS07.....	55
Figura 34 - Suscetibilidade não classificada a desabamentos, baseada no GTF, através do método do Valor Informativo.....	60
Figura 35 - Partição aleatória do inventário de fontes de desabamentos, grupo 1 e no grupo 2 e distribuição espacial na área de estudo	64
Figura 36 - Classes de suscetibilidade a desabamentos com base na curva sucesso do modelo GTF	74
Figura 37 - Suscetibilidade não classificada a desabamentos modelada com o G1.....	75
Figura 38 - Classes de suscetibilidade a desabamentos com base na curva de predição dos desabamentos do G2.....	76
Figura 39 - Suscetibilidade não classificada a desabamentos modelada com o G2.....	78
Figura 40 - Classes de suscetibilidade a desabamentos com base na curva de predição dos desabamentos do G1.....	79

Figura 41 - Suscetibilidade a desabamentos, A) modelado o G2_LD e validado com o G1_LD; B)
modelado com o G2 e validado com o G1 86

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Abrangência das tipologias de movimentos de vertente, movimentos de terreno e movimentos de massa (Zêzere, 1997)	17
Tabela 2 - Principais tipologias de movimentos de vertentes definidas pela Working Party on World Landslide Inventory	18
Tabela 3 - Inventário de desabamentos sobre ortofotomapa e pré-validado	36
Tabela 4 - Inventário final das fontes de desabamentos sobre o ortofotomapa, pré-validado e validado e trabalho de campo	39
Tabela 5 - Base cartográficas utilizadas no processamento das variáveis	42
Tabela 6 - Comparação da área instabilizada das fontes de desabamentos na conversão dos dados em formato vetorial para o matricial, em células de 5x5m (25m ²)	44
Tabela 7 - Unidades de ocupação do solo reclassificado a partir da classificação proveniente da COS'2007	48
Tabela 8 – Classificação das unidades de litológicas	50
Tabela 9 - Variáveis e classes dos fatores de predisposição utilizadas na modelação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos	51
Tabela 10 - <i>Scores</i> das variáveis utilizadas na construção do modelo de suscetibilidade pelos métodos do Valor Informativo (VI), com o grupo total de fontes de desabamentos	57
Tabela 11 - Scores do VI do GTF e unidade de condições únicas	59
Tabela 12 - Relação entre fontes de desabamentos identificadas (%) e área de estudo classificada como suscetível por ordem decrescente (%) para as taxas de sucesso do modelo GTF	62
Tabela 13 - Dados relativos aos inventários de fontes de desabamentos obtidos por partição aleatória (Grupo 1 e Grupo 2) a partir do inventário global	64
Tabela 14 - <i>Scores</i> do VI das variáveis utilizadas na construção do modelo de suscetibilidade pelo método do Valor Informativo com as fontes de desabamentos do G1	65
Tabela 15 - Relação entre fontes de desabamentos identificadas (%) e área de estudo classificada como suscetível por ordem decrescente (%) para as taxas de sucesso e predição do modelo do G1	66
Tabela 16 - <i>Scores</i> do VI das variáveis utilizadas na construção do modelo de suscetibilidade pelos métodos do Valor Informativo com as fontes de desabamentos do G2	67

Tabela 17 - Relação entre fontes de desabamentos identificadas (%) e área de estudo classificada como suscetível por ordem decrescente (%) para as taxas de sucesso e predição do modelo do G2	68
Tabela 18 - Scores do VI de G1 e G2 e unidade de condições únicas	69
Tabela 19 - Modelos selecionados para a classificação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos	71
Tabela 20 - Classificação qualitativa da suscetibilidade adotada	72
Tabela 21 - Características das classes de suscetibilidade a desabamentos e percentagem de movimentos validados com base na curva de sucesso	73
Tabela 22 - Características das classes de suscetibilidade a desabamentos e percentagem de movimentos validados com base na curva de sucesso e curva de predição	75
Tabela 23 - Características das classes de suscetibilidade a desabamentos e percentagem de movimentos validados com base na curva de sucesso e curva de predição	78
Tabela 24 - Hierarquia dos fatores de predisposição da instabilidade	82
Tabela 25 - AAC das taxas de sucesso do modelo de suscetibilidade do grupo 2, obtidas por análise sensitiva com a combinação de diferentes variáveis condicionantes da instabilidade, segundo o método do Valor Informativo.....	82
Tabela 26 - Valores de VI por pixel das variáveis na análise sensitiva e unidade de condições únicas.....	84
Tabela 27 - Características das classes de área decrescente de suscetibilidade a desabamentos dos modelos com 3 e 4 factores de predisposição definidas com base na curva de predição	85
Tabela 28 - Características das classes de área decrescente de suscetibilidade a desabamentos dos modelos com 2 e 5 factores de predisposição definidas com base na curva de predição	87

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Classificação das metodologias de avaliação da suscetibilidade (adaptado de Guzzetti et al 2009).....	24
Gráfico 2 - Percentagem de área ocupada pelas classes de declive e respetiva percentagem de área total com desabamentos	53
Gráfico 3 - Percentagem de área ocupada pelas classes de exposições de vertentes e respetiva percentagem de área com desabamentos.....	54
Gráfico 4 - Percentagem de área ocupada pelas classes de curvatura das vertentes e respetiva percentagem de área com desabamentos.....	54

Gráfico 5 - Percentagem de área ocupada pelas classes do uso do solo e respetiva percentagem de área total com desabamentos.....	55
Gráfico 6 - Percentagem de área ocupada pelas classes de litologia e respetiva percentagem de área total com desabamentos	56
Gráfico 7 - Curvas de sucesso e modelo não classificados do grupo total de fontes de desabamentos	63
Gráfico 8 - Taxa de sucesso do G1 e taxa de predição do G2 do modelo de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos, através do método do Valor Informativo.....	66
Gráfico 9 - Taxa de sucesso do G2 e taxa de predição do G1 do modelo de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos, através do método do Valor Informativo – Teste 2	68
Gráfico 10 - Curvas da taxa de sucesso da avaliação da suscetibilidade com o método do Valor Informativo, modelada com o GTF e respetiva divisão de classes de suscetibilidade.....	72
Gráfico 11 - Curvas da taxa de predição e de sucesso modelada com os desabamentos do G1 e validada com o G2 e respetiva divisão de classes de suscetibilidade	74
Gráfico 12 - Curvas da taxa de sucesso e predição, modelada com os desabamentos do G2 e validada com o G1 de desabamentos e respetiva divisão de classes de suscetibilidade	77
Gráfico 13 - Curvas de sucesso para cada fator de predisposição aos desabamentos no G2.....	81
Gráfico 14 - Curvas de sucesso e predição dos modelos de avaliação da suscetibilidade a desabamentos obtidas com a combinação de 2 a 5 variáveis independentes.	83

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - Enquadramento ao tema

O estudo da instabilidade de vertentes assume um papel fundamental nas questões do ordenamento do território e para realizar uma eficaz avaliação da suscetibilidade, é fundamental conhecer a instabilidade geomorfológica presente e passada e a predisposição do território para a ocorrência de movimentos de vertente (Zêzere, 2007).

A importância dada à análise da suscetibilidade de movimentos de vertente para o ordenamento do território, pretende-se nesta investigação, identificar áreas suscetíveis à ocorrência de desabamentos, com a aplicação de modelos de relação espacial. A compreensão e a interpretação da evolução das vertentes torna-se fundamental para um adequado ordenamento do território. Neste sentido, o conceito de suscetibilidade deve ser entendida como a incidência espacial do perigo, ou seja, representa a propensão de uma área para ser afetada por um determinado perigo (desabamento), em tempo indeterminado, avaliada com recurso a fatores de predisposição para a ocorrência dos processos, não contemplando o seu período de retorno ou a probabilidade de ocorrência (Zêzere, 2010).

A área de estudo corresponde ao concelho de Castelo de Paiva e integra-se entre as regiões da Beira e do Douro litoral, que apresenta, no contexto português, uma das posições mais favoráveis de predisposição natural para a instabilidade de vertentes. Foi definido como área de estudo por apresentar situações/condições muito favoráveis em termos de propensão natural para a ocorrência de queda de blocos.

Neste estudo foi adotado a classificação e terminologia de movimentos de vertente definida pela Working Party on World Landslide Inventory (WP-WLI, 1993), que foi realizada por um grupo de trabalho da UNESCO para uniformizar as terminologias internacionais, que consideram 6 tipos principais de movimentos de vertente: desabamento, balançamento, deslizamento, expansão lateral, fluxo/escoada e movimentos complexos (WP-WLI, 1993a, 1993b). O conceito de desabamento é definido como uma deslocação de solo ou rocha a partir de um abrupto rochoso, ao longo de uma superfície onde os movimentos tangenciais são nulos ou reduzido. Os materiais deslocam-se pelo ar, por queda, saltação ou rolamento (WP-WLI, 1993).

A suscetibilidade de uma área de estudo é avaliada com recurso a vários modelos, que poderão ser determinísticos, heurísticos e estatísticos, no entanto em Portugal e noutros países, há uma preferência pelos modelos estatísticos. É apresentada uma síntese das vantagens e

limitações dos métodos a utilizar para a predição das áreas suscetíveis à ocorrência de movimentos de vertentes.

1.2 - Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é a avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos no concelho de Castelo de Paiva, utilizando um modelo de base estatística. São desenvolvidos e aplicados conjunto de metodologias para permitem aprofundar o conhecimento da avaliação da suscetibilidade.

Na concretização do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos;

1. Elaboração do inventário de desabamentos, com base em ortofotomapas e trabalho sobre o terreno;
2. Identificação, caracterização e ponderação dos fatores de predisposição a utilizar na modelação;
3. Análise das relações estatísticas entre a distribuição das fontes de desabamentos e os fatores de predisposição com a utilização do método estatístico bivariado de suporte bayesiano, o método do Valor Informativo (VI);
4. Validação dos modelos preditivos com recurso à construção das taxas de sucesso e de predição, cálculo da área abaixo da curva com a realização da partição aleatória do inventário de fontes de desabamentos com a finalidade de originar grupos independentes de modelação (treino) e validação (teste);
5. Análise sensitiva da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos com base no modelo estatísticos adotado, para determinar os fatores mais importantes à ocorrência de desabamentos, mediante ao peso diferenciado de cada variável independente, com recurso as taxas de sucesso.

1.3 - Estrutura da dissertação

Para dar resposta ao objetivo geral e específicos, a presente dissertação foi estruturada em 5 capítulos, inicia-se com o capítulo 1, Introdução, o capítulo 2 apresenta o estado da arte dos movimentos de vertente. O capítulo 3 é dedicado às metodologias, inventariação dos movimentos de vertente e processamento das variáveis utilizadas na modelação. A avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos no concelho de Castelo de Paiva é desenvolvida no capítulo 4, no capítulo 5 apresenta-se as conclusões do trabalho.

No capítulo 1, faz-se o enquadramento do tema, apresenta-se o objetivo geral e específicos pretendidos e a estrutura de elaboração deste trabalho.

Neste capítulo apresenta-se ainda o enquadramento físico da área de estudo, onde são especificados o enquadramento geográfico do concelho e dando relevância à geologia, litologia e ao enquadramento geomorfológico.

No Capítulo 2, movimentos da vertente, é efetuado o estudo relacionado com a instabilidade das vertentes, nas diversas publicações que foram consultadas para a elaboração do presente trabalho. Pesquisa e síntese sequencial do estado da arte, importante estudo para a compreensão da dinâmica atual das vertentes, onde são especificados os critérios de classificação e de caracterização morfológica dos movimentos de vertente.

No capítulo 3 apresentam-se as metodologias na construção do inventário de fontes de desabamentos, abordando os métodos de aquisição, armazenamento da informação geográfica e processamento de dados.

Neste capítulo analisam-se as vantagens e limitações das diferentes metodologias de avaliação da suscetibilidade, abordando questões das técnicas e ferramentas essenciais para aplicação na modelação de desabamentos.

São abordados os procedimentos de pré-processamento da variável dependente e das variáveis independentes utilizadas na modelação, são definidas todas as bases cartográficas utilizadas na inventariação das fontes de desabamentos e a caracterização e identificação dos fatores de predisposição, onde é definido a unidade de terreno ou unidades matriciais, e estabelecer critérios de preparação nas classificações e reclassificações de todas as variáveis que levaram à integração num projeto em sistemas de informação geográfica (SIG).

No capítulo 4, avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos no concelho de Castelo de Paiva, apresentam-se as metodologias utilizadas no zonamento da suscetibilidade na área em estudo, cartografia dos factores condicionantes da instabilidade de vertentes e metodologias de modelação espacial da suscetibilidade. São definidos os processos metodológicos na produção de cartografia de suscetibilidade à ocorrência de desabamentos e a adoção do método de análise estatística bivariada - VI para o zonamento da suscetibilidade. Nesta fase são analisados e demonstrados em tabelas todos os fatores de predisposição com relevância na avaliação e são demonstrados os scores das variáveis utilizadas na construção do modelo de suscetibilidade pelo método do VI.

A validação dos resultados foi realizada com recurso a uma partição aleatória das fontes de desabamentos e cálculo das respetivas curvas de sucesso e de predição.

No final da avaliação os melhores modelos foram classificados, que consistiu na divisão em classes em função da rotura de declives existentes na curva de taxa de sucesso para o Grupo Total de Fontes (GTF) e da taxa de predição para o Grupo 1 (G1) e Grupo 2 (G2).

Foi realizada uma análise sensitiva aos fatores condicionantes da instabilidade. Nesta análise considerou-se de modo individual cada uma das variáveis utilizadas na modelação que vão justificar quais as que terão maior importância na explicação da localização dos desabamentos. Para cada classe de cada fator de pré-disposição foi calculado o Valor Informativo e seguidamente da representação cartográfica da suscetibilidade dos modelos produzidos.

Nas conclusões deste trabalho, capítulo 5, são efetuadas as considerações gerais dos resultados alcançados que definiram o objetivo geral e específicos propostos nesta investigação, e indicadas perspectivas de desenvolvimento futuro.

1.4 - Metodologia geral seguida na Investigação

Na execução desta dissertação aplicaram-se metodologias e técnicas, sintetizadas em 3 fases:

- 1º. Na primeira fase houve uma pesquisa e leitura bibliográfica sobre o tema, e seguidamente a aquisição de informação geográfica referente à área de estudo, o concelho de Castelo de Paiva;
- 2º. Na segunda fase realizou-se o planeamento, organização e armazenamento da informação geográficos numa base de dados geográfica produzida num SIG no qual processou-se os dados da variável dependente (inventários de fontes de desabamentos) e das variáveis independentes (fatores de predisposição) para utilizar na modelação da suscetibilidade;
- 3º. Na terceira fase procedeu-se à modelação dos dados, com a aplicação do método estatísticos bivariado, o valor informativo, com unidades de terreno matriciais (pixel de 5 metros).

A figura 1 sintetiza o fluxo de trabalho de preparação das diferentes fases na elaboração desta dissertação.

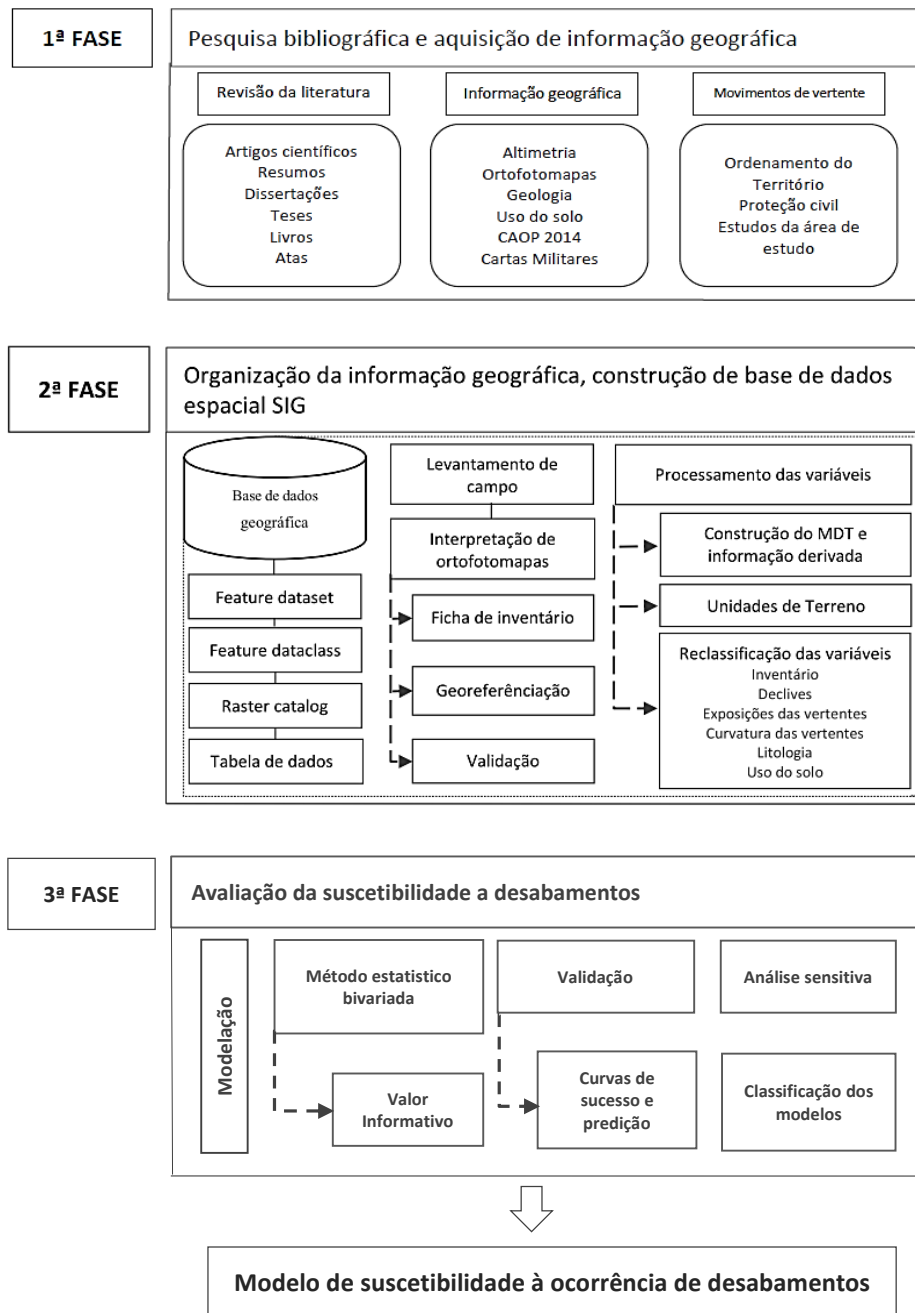


Figura 1 - Esquema metodológico aplicado ao desenvolvimento da investigação

O desenvolvimento da investigação ao tema, implicou uma leitura e recolha de bibliografia adequada e disponível, conhecimentos dos métodos de classificação e inventariação de movimentos de vertente, modelos a utilizar para a predição das áreas suscetíveis à ocorrência de desabamentos, aplicação de procedimentos de validação fundamentados no cruzamento do inventário com a suscetibilidade e ferramentas informáticas utilizadas na modelação de desabamentos.

A pesquisa da informação geográfica foi adquirida no município de Castelo de Paiva, na direção geral do território e no instituto geográfico do exército. Na cartografia digital, foi recolhida à escala 1:10 000, a altimetria, planimetria, ortofotomapas com resolução de 0,25m de 2008, à escala 1:25 000 a carta de ocupação do solo de 2007 (COS2007) e cartas militares, (nº 134, nº 135, nº 144 e nº 145) e a Carta administrativa oficial de Portugal (CAOP) de 2014. Em suporte analógico a carta geológica (13-B) do concelho à escala 1:50 000 que posteriormente foi vetorizada.

Esta fase foi concluída com a pesquisa e recolha de informações sobre trabalhos ou relatórios com informações de movimentos de vertente da área de estudo.

Na 2ª fase foi efectuada a organização da informação geográfica e a elaboração de uma base de dados espacial em sistemas de informação geográfica (SIG). Na base de dados espacial foi inserido o inventário de fontes de desabamentos georreferenciados e elaborado com recurso à interpretação de ortofotomapas e levantamento de campo.

No processamento das variáveis recorreu-se à informação altimétrica (curvas de nível com equidistância de 10 metros e pontos cotados) para produzir o Modelo Digital de Terreno (MDT) e extrair informação derivada: declives, exposições das vertentes e curvatura das vertentes. A informação derivada do MDT, o uso do solo e a litologia foi convertido em raster com um pixel de 5 metros, bem como o inventário de fontes de desabamentos.

Na 3ª fase, a avaliação da suscetibilidade foram realizados os procedimentos metodológicos sistematizados, para dar resposta aos objetivos pretendidos nesta dissertação. Foi realizado a modelação da suscetibilidade, através do método do valor informativo (VI), os modelos foram validados com a técnica das curvas de sucesso e de predição e área abaixo da curva.

As metodologias e procedimentos referidos, serão descritas de forma mais pormenorizada no capítulo 3 e 4 deste trabalho.

1.5 - Justificação da escolha da área de estudo

A área de estudo corresponde ao concelho de Castelo de Paiva e integra-se entre as regiões da Beira e do Douro litoral, que apresenta, no contexto português, uma das posições mais favoráveis de predisposição natural para a instabilidade de vertentes.

Foi definido como área de estudo por apresentar, condições muito favoráveis em termos de propensão natural para a ocorrência de queda de blocos.

A este nível pode-se mencionar um relatório desenvolvido e elaborado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por solicitação da Câmara municipal de Castelo de Paiva em 2006, sobre a estabilidade dos blocos rochosos no Monte de São Domingos.

O trabalho previamente desenvolvido no concelho “Cartografia geológica e geomorfológica para a caracterização de riscos naturais à escala do Planeamento regional: aplicação ao concelho de Castelo de Paiva (NW de Portugal)” (Gomes & Chaminé, 2005). O trabalho menciona a existência de cornijas quartzíticas compostas por um maciço rochoso compartimentado por grandes blocos fraturados com vertentes com declives muito elevados, favoráveis à rotura das superfícies, que poderão originar queda de blocos. Indicam como traço principal geomorfológico a constituição de uma série de elevações quartzíticas - xistentas, alinhados com a direção NW-SE e afloramentos graníticos, onde podemos encontrar nos altos de São Domingos, São Gens, São Paul, elevações de Pedorido e Alto de Santo Adrião e no lugar de Bairros, (Gomes & Chaminé, 2005).

1.6 - Enquadramento físico do concelho de Castelo de Paiva

1.6.1 - Enquadramento geográfico

Na elaboração deste trabalho foi escolhida como área de estudo, o concelho de Castelo de Paiva, em toda a sua extensão territorial.

O concelho de Castelo de Paiva, localiza-se no norte de Portugal continental, no distrito de Aveiro (Figura 2). Confinha a norte com os concelhos do Marco de Canaveses e Penafiel, a sul e a sudeste o concelho de Arouca, a este o concelho de Cinfães e a oeste a noroeste está circunscrito pelo concelho de Gondomar.

Integrado na região Norte, está inserido na Nut III – Sub-região do Tâmega, apresenta uma área de 115, 04 km² e é constituído por 6 freguesias, Fornos, União de freguesias de Sobrado-bairros, Real, São Martinho, Santa Maria de Sardoura e União de freguesias de Paraíso, Pedorido e Raiva.

Toda a superfície do concelho pertence á parte terminal da bacia hidrográfica do rio Douro, individualizando-se na sua área territorial as sub-bacias do rio Paiva, rio Sardoura e do rio Arda. O concelho apenas abrange a margem esquerda do rio Douro e rio Paiva.

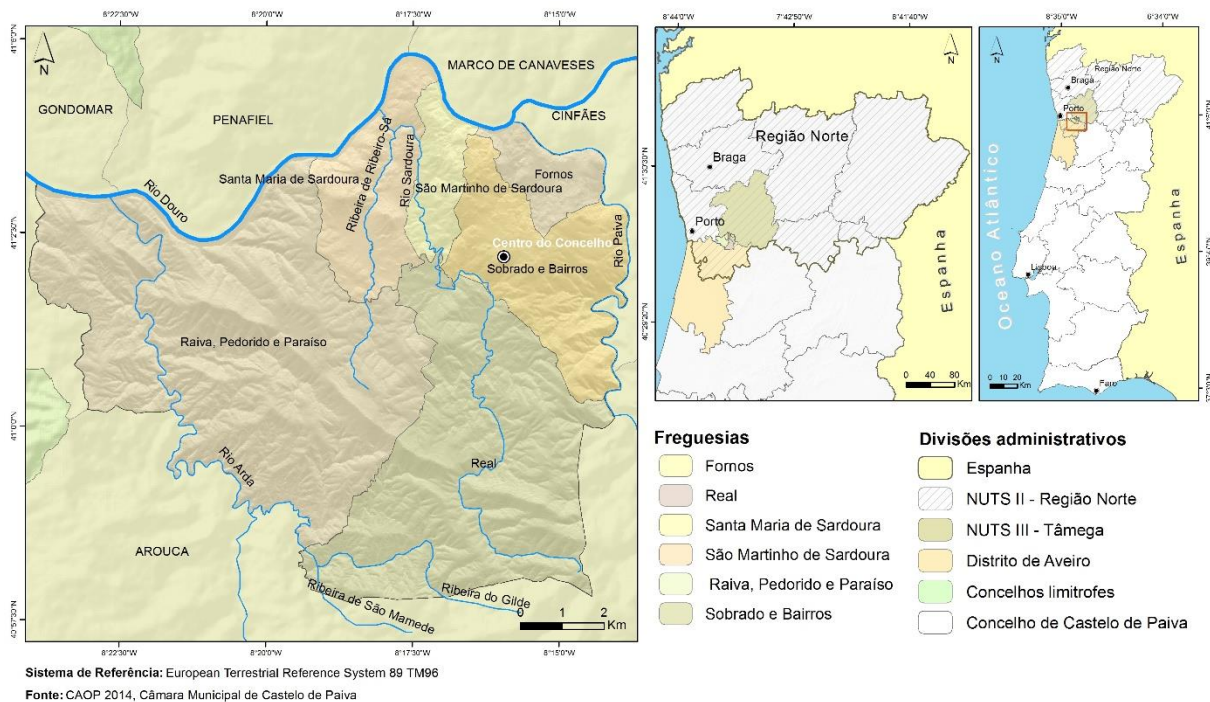


Figura 2 - Enquadramento geográfico de Castelo de Paiva

1.6.2 - Caracterização geológica e estruturas tectónicas

O concelho de Castelo de Paiva localiza-se na bacia hidrográfica do rio Douro, entre um conjunto de relevos montanhosos a Este, nas quais se destaca a serra granítica de Montemuro (1383m), e as áreas mais aplanadas da plataforma litoral a Ocidente (Rebello 1975, 1984). A marginal, a Sul, desenvolve-se a área deprimida de Arouca e atravessa o concelho um conjunto de elevações constituídas essencialmente por rochas quartzíticas pertencente à megaestrutura designada por Anticlinal de Castelo de Paiva (Chaminé & Gomes, 2005)

Castelo de Paiva insere-se no ponto de vista geotectónico, na zonação definida para o Maciço Ibérico, na Zona Centro-Ibérica (ZCI) do terreno autóctone ibérico (Ribeiro et al. 1990). A região de Castelo de Paiva é constituída essencialmente pelas seguintes unidades geológicas (Figura 3):

- 1- Uma extensa mancha de rochas metassedimentares, incluindo parte do importante megadobramento, de orientação NW-SE, o Anticlinal de Castelo de Paiva;
- 2- Granitoides, com megacisalhamentos dúcteis relacionados com a orogenia varisca (Ferreira et al. 1987).

O Anticlinal de Castelo de Paiva está limitado a oeste pelo megacisalhamento esquerdo, ativo desde as fases precoces da orogenia varisca, denominado por Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão (Lemos de Sousa, 1978; Pinto de Jesus, 2001).

O concelho marca presença de escassos afloramentos de depósitos de cobertura (aluviões e terraços) de idade quaternária recente (Medeiros et al., 1964). Assim, ao longo do rio Douro e seus afluentes, assinalam-se extensas acumulações de areias e/ou cascalheiras aluviais e no fundo dos vales fluviais acumulam-se, abundantemente, depósitos finos e argilosos.

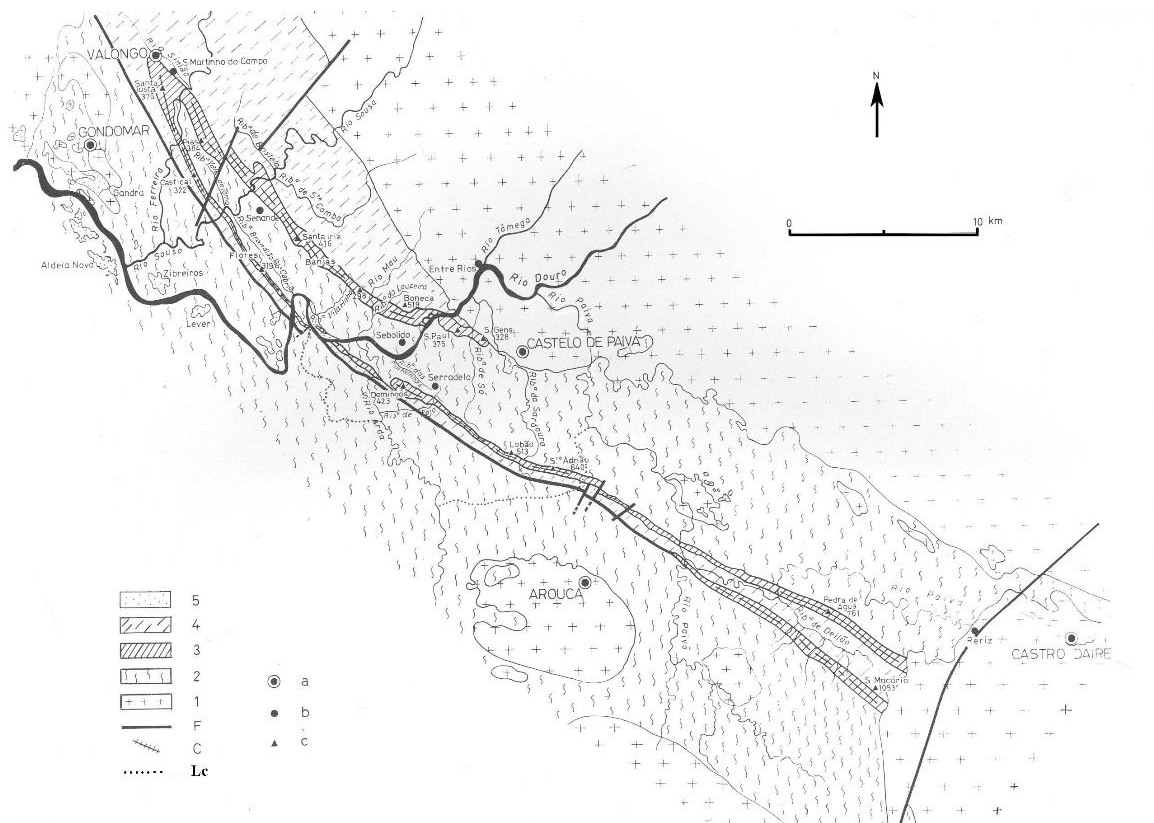


Figura 3 - Esboço litológico da região de Castelo de Paiva - Castro Daire (Rebello, 1984). 5. Depósitos de cobertura (Plio-Quaternário), 4. Rochas metassedimentares (Paleozóico médio-superior); 3. Quartzito Armoricano; 2. Rochas metassedimentares (Proterozóico superior e/ou Câmbrio); 1. Granitóides (variscos); F - Falha; C - Vale de fratura; a – Sede de Concelho, b – Outras povoações, c- Marcos geodésicos)

As características essenciais de cada unidade geológica, relativo às rochas metassedimentares, presentes no sector em questão são, sinteticamente, as seguintes, do topo para a base (Figura 4):

1 - O Carbonífero (Estefaniano C inferior)

Na geologia regional considera-se que a Bacia Carbonífera do Douro, constitui o mais extenso afloramento de Carbonífero continental existente em Portugal, estendendo-se desde São Pedro Fins (Este do Porto) até Janarde (Este de Arouca), ao longo de uma estreita faixa, de orientação geral NW-SE, com cerca de 50 km de comprimento e raramente ultrapassando os 500 m de largura (Lemos de Sousa, 1978; Pinto de Jesus, 2001). Na Bacia Carbonífera do Douro, a sequência tectonosedimentar constam genericamente de conglomerados, arenitos,

xistos cinzentos amarelados a negros onde se assinalam a presença de fósseis e níveis de carvão.

O Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão (SCDB) preserva o carbonífero superior (Estefaniano C inferior) continental (Wagner & Sousa, 1983), depositado em bacias límnicas de características intramontanhas. Aflora localmente numa faixa descontínua, de possança métrica e extensão quilométrica, desde as localidades de Pedorido até Pejão.

A Bacia Carbonífera do Douro encontra-se limitada, a nordeste, pelas unidades do paleozóico inferior inseridas no flanco inverso do Anticlinal de Castelo de Paiva, e a sudoeste, pelo Câmbrico e/ou Precâmbrico superior do “Complexo Xisto-Grauváquico” (CXG).

O contacto geológico entre o Carbonífero superior e o CXG corresponde aparentemente a uma discordância estratigráfica, enquanto o limite geológico entre o Carbonífero superior e o Ordovícico faz-se por falha inversa que provocou o cavalgamento da Bacia Carbonífera pelos terrenos mais antigos do paleozoico inferior (Pinto de Jesus, 2001).

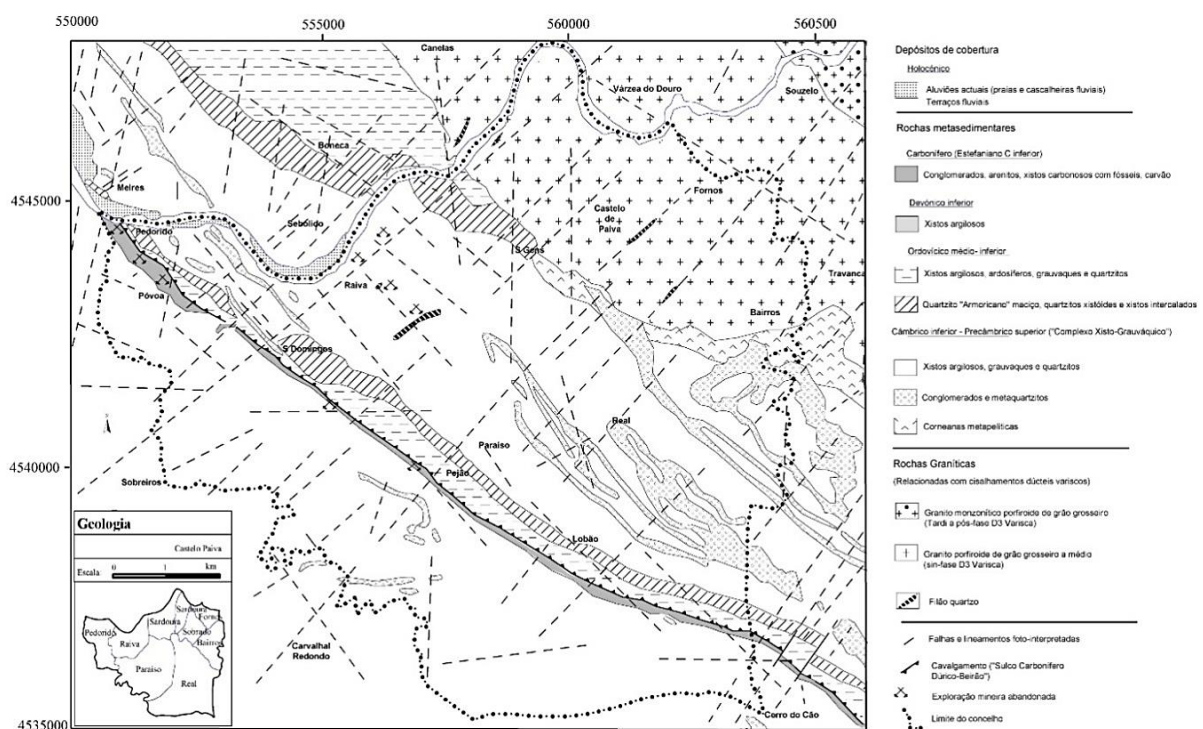


Figura 4 - Geologia do concelho, adaptado e revisto de (Medeiros et al, 1964)

2 - Ordovícico médio-inferior

Da importante megaestrutura geológica denominada por Anticlinal de Castelo de Paiva, onde foram reconhecidas, para além do CXG, uma sucessão de unidades estratigráficas de idade Ordovícica (Medeiros et al., 1964). Estas unidades escalonam-se na seguinte sequência típica, da base para o topo: Formação do Quartzito ‘Armoricano’ (quartzitos maciços, dispostos

em níveis alternantes com quartzitos xistóides e conglomeráticos; estes afloramentos constituem importantes relevos de resistência na região; *cf.* Rebelo 1975); Formação de Castelo de Paiva (xistos ardosíferos e xistos argilosos finos); Formação de Sobrido (quartzitos, metarenitos e grauvaques, com intercalações de materiais orgânicos).

3 - Câmbrio inferior - Precâmbrio superior

O Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão constitui um importante limite geológico que esteve na base da divisão do denominado Super-grupo Dúrico Beirão do “Complexo Xisto-Grauváquico”. O CXG em Castelo de Paiva é composto por uma sequência ‘flyschóide’ com alternâncias de xistos argilosos e de metagrauvaques e com intercalações de conglomerados e de quartzitos. Os xistos e os metagrauvaques, de grão fino a médio, têm matriz quartzo-micácea abundante com clastos quartzo feldspáticos e raros elementos líticos (Medeiros et al., 1964; Teixeira, 1981; Aguado & Martínez – Catalán, 1994), assinala-se que as intercalações conglomeráticas e/ou quartzíticas são particularmente possantes na parte ocidental do SCDB (Chaminé & Gomes, 2005).

4 - Rochas Graníticas

As rochas graníticas afloram fundamentalmente na região de Castelo de Paiva - Tarouquela e enquadram-se na faixa de granitóides variscos, de orientação geral NW-SE, do Alto Minho - Beiras. A distribuição espacial destes granitóides está relacionada, em regra, com megacisalhamentos dúcteis (Ferreira et al., 1987). Os maciços em questão podem ser diferenciados nas seguintes fácies: i) granito monzonítico, porfiróide, de grão grosseiro e predominantemente biotítico [tardi a pós-fase D3 varisca] - granitóide Tarouquela; e ii) granito porfiróide, de grão grosseiro a médio [sin-fase D3 varisca] que localmente forma uma extensa faixa de orientação NW-SE, com corneanas metapelíticas e xistos mosqueados a ocorrerem, nas bordaduras destes granitóides, por metamorfismo de contacto no limite com o CXG - granitóide de Castelo de Paiva. Os granitóides da série intermédia (sin a tardi-fase D3) distribuem-se em largas faixas, lateralmente aos megacisalhamentos do SCDB, e estão controlados tectonicamente por sistemas de fracturas frágeis conjugadas, de orientações regionais médias, NW-SE e NE-SW.

Relativo a tectónica regional, a observação estereoscópica da fotografia aérea e a análise morfoestrutural dos mapas topográficos militares (IGeoE), escala 1/25000, da Lomba-Gondomar (folha 134), de Sobrado do Paiva (folha 135), e de Nespereira-Cinfães (folha 145), revelou a presença de uma fracturação regional secundária associada a falhas de expressão

regional. A compilação, a análise, a interpretação e a síntese da informação geológico estrutural possibilitou a elaboração de um esboço geológico síntese da região de Castelo de Paiva, presente na figura 4 (Chaminé & Gomes, 2005).

A rede de fracturação e lineamentos tectónicos fotointerpretados constituem fundamentalmente os sistemas subparalelos aos acidentes tectónicos maiores, ou seja, às estruturas tectónicas de orientação N-S a NNE-SSW (falhas do Porto e do Gerês) (Cabral & Ribeiro, 1988), e ao megacisalhamento do SCDB de orientação NW-SE. Destacam-se dois sistemas de fracturação regionais: a) sistemas NNE-SSW a N-S e conjugados, menos frequentes, NNE-SSE a W-E; b) sistema NW-SE e conjugado NE-SW (Chaminé & Gomes, 2005).

Relativo à fracturação local, além do acidente tectónico principal e associados do SCDB de direcção NW-SE, os lineamentos estruturais (subparalelos à falha do Gerês e/ou ao megacisalhamento regional Verín - Peso da Régua, i.e., NNE-SSW) da região de Lomba - S. Miguel do Mato e do v.g. Castro Daire (a SE de Tarouquela) e do v.g. do Cerro do Cão (NNE de Arouca). A fracturação com direcção média E-W, apesar de discreta encontra-se presente na região (Chaminé & Gomes, 2005).

Os relevos dominantes na região estudada relacionam-se com a ocorrência de bancadas quartzíticas subverticalizadas que, por erosão diferencial, deram origem a cristas com orientação geral NW-SE. A fracturação regional com orientação média NE-SW intersecta as referidas cristas, formando-se alguns cabeços subarredondados, como o de Pedrogo (Oliveira do Arda), no entanto, a orientação média das cristas seja de direcção NW-SE. A maior parte da rede hidrográfica principal e secundária adapta-se à resistência das rochas quartzíticas, não as atravessando e seguindo traçados mais ou menos rectilíneos, paralelos ao alinhamento das cristas, ajudando, assim, à definição das mesmas (Rebelo 1975, 1984). Porém, alguns cursos de água conseguem franquear os quartzitos, aproveitando, eventualmente, fraturas transversais à orientação média das cristas.

Os mais importantes acidentes tectónicos de direcção NW-SE acompanham a Bacia Carbonífera do Douro em toda a sua extensão, coincidindo, em parte, com a superfície principal do Anticlinal de Castelo de Paiva. Outro importante sistema, de orientação NE-SW, com desligamentos esquerdos, é praticamente perpendicular ao anterior. A origem destes acidentes está relacionada com as fases compressivas (D1, D3) da orogenia varisca nas quais o campo de tensões vigente apresenta a compressão principal máxima com orientação aproximada NE-SW. Posteriormente, nos tempos tardi-variscos (pós-fase D3) conducentes a fracturação frágil,

dá-se uma variação no campo de tensões passando a tensão compressiva a assumir uma orientação aproximadamente N-S (Chaminé & Gomes, 2005).

A fraturação gerada nas fases precoces dúcteis varriscas, é assim retomada como desligamentos frágeis conjugados, um de orientação NE-SW, esquerdo, outro de direção NW-SE, direito. Simultaneamente desenvolveram-se grandes fraturas frágeis N-S a NNE-SSW e suas conjugadas E-W a NNE-SSW, menos desenvolvidas do que as primeiras (Chaminé & Gomes, 2005).

1.6.3 - Caracterização geomorfológica

Os principais traços do relevo do concelho de Castelo de Paiva são um aumento de altitude para o sector Sudoeste e os profundos rasgos formados por vales encaixados dos rios Douro, Paiva e Arda que constituem, respetivamente, os limites Norte, Leste e Oeste (Figura 5). O limite Sul é composto por uma cortina de elevações onde se encontra o ponto mais elevado do concelho (710m). O relevo do concelho é marcado topograficamente por dois alinhamentos orográficos paralelos, com uma direção geral NW-SE (Rebelo, 1975, 1984). Os alinhamentos NW-SE demonstrados na topografia pelas cristas quartzíticas ressaltam-se nitidamente no relevo local, nomeadamente no Sul e Norte do concelho. No Norte, o relevo é mais movimentado, é mais difícil reconhecer os alinhamentos correspondentes aos afloramentos quartzíticos. A figura 5, evidência os afloramentos que são bem visíveis na topografia, nas escarpas rigidamente alinhadas, com direções próximas de NW-S

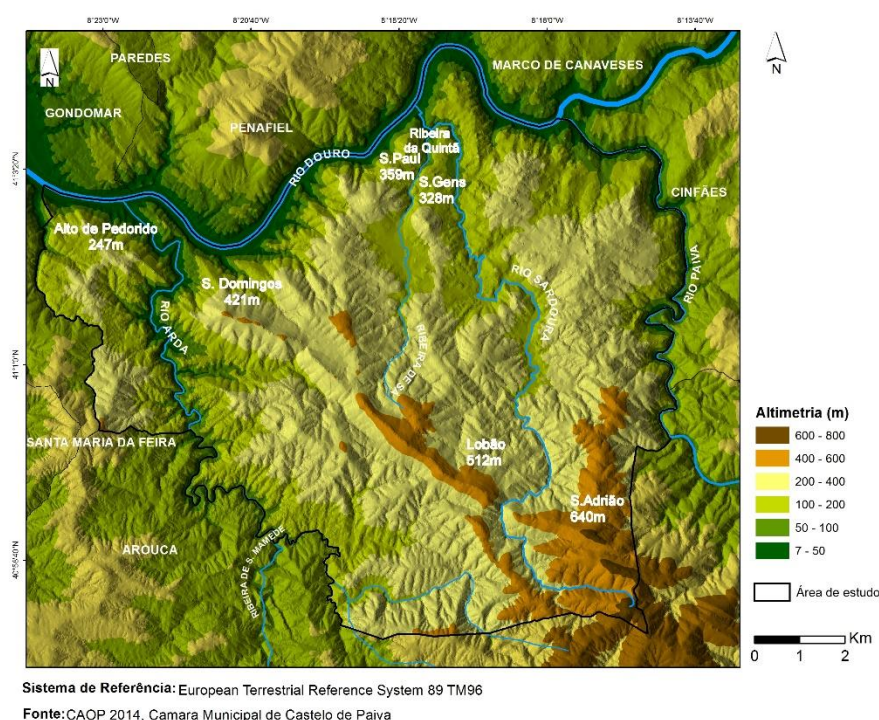


Figura 5 - Altimetria do concelho de Castelo de Paiva

Na área de estudo identificaram-se 4 unidades geomorfológicas (Figura 6), cristas quartzíticas/elevações quartzíticas com abrupto rochoso; colinas e serras xistosas; rechãs e topos aplanados graníticos e encostas do Douro e Paiva (Chaminé & Gomes, 2005).

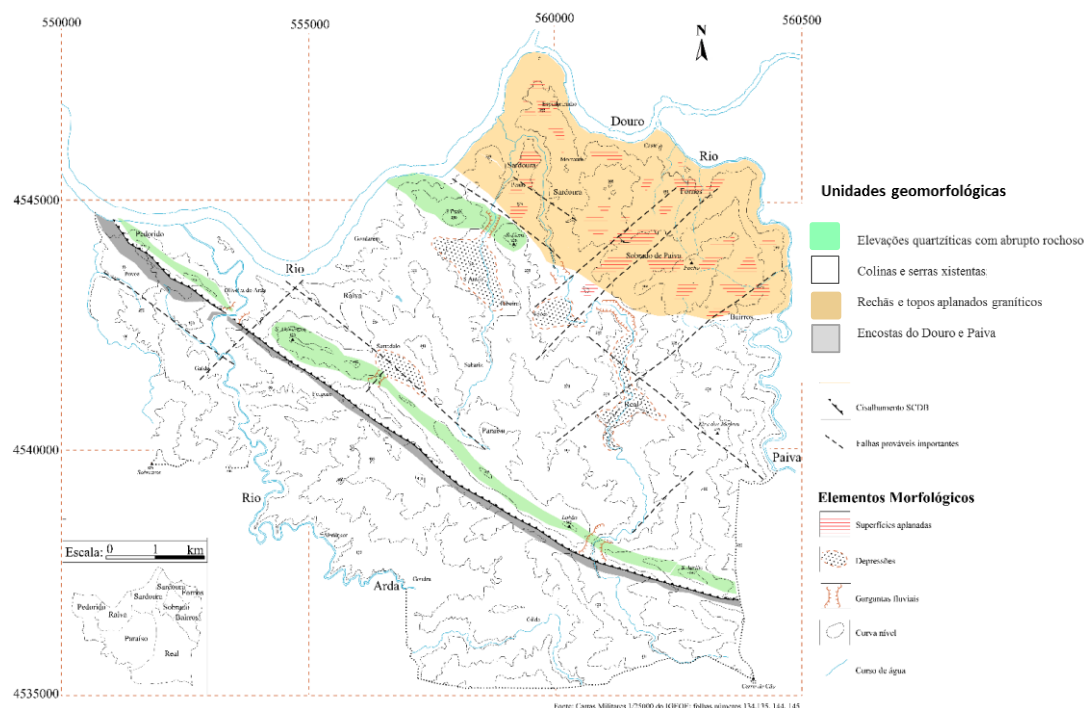


Figura 6 - Unidade geomorfológica principais em Castelo de Paiva

A unidade geomorfológica das elevações quartzíticas é constituída por duas faixas de elevações essencialmente compostas por quartzitos, alinhados na direção NW-SE, com topos, rigidamente alinhados, aplanados, exíguos e em regra alongados, tomando a forma de crista do qual a altitude dos topos vai aumentando para SE. As vertentes são na sua maioria retilíneas e íngremes, com declives dos 20° a 25°.

O alinhamento mais a Norte abrange as elevações do Alto de S. Paul (359m) e Alto de S. Gens (328m). As vertentes são em grande parte retilíneas e muito íngremes voltadas para o rio Douro e a garganta apertada da Ribeira da Quintã de orientação NNE-SSW (Figura5).

No ramo Sul distinguem-se dois segmentos, o mais baixo a NW, abrangendo os altos de Pedorido (247m) e Oliveira do Arda, (245m), definem vertentes voltadas a norte muito abruptas com declives entre 25° e 30 e elevações estreitas com o topo aplanado. O rio Arda rompe a faixa Sul com uma orientação geral NNE-SSW isolando uma pequena crista na margem esquerda de 158 metros de elevação.

O prosseguimento da faixa Sul inicia-se no do alto de S. Domingos, uma imponente elevação com 423 m de altitude, prolongando-se pelos altos de Lobão (513m) e S. Adrião (647m).

Globalmente o alinhamento quartzítico é assinalado por alguns topos exíguos, alongados, aplanados e desnivelados. As elevações são constituídas por vertentes muito abruptas e extensas com cerca de 2 km, na sua maioria retilíneas, viradas a SW. Nestas vertentes reúnem-se condições propícias para ocorrerem movimentações de materiais, pois no topo estão presentes cristas quartzíticas constituídas por um maciço rochoso compartimentado por grandes blocos fraturados.

Os quartzitos apresentam maior resistência (dureza relativa ao material rochoso) relativamente às rochas envolventes, geralmente xistos. As rochas quartzíticas salientam-se na paisagem (Figura 7) originando relevos imponentes e característicos, com formas rigidamente alinhadas e, em regra, alongadas, tomando a forma de crista. Embora não estando sempre presentes no topo das elevações, surgem salientes nas vertentes das elevações onde se integram, possuindo no local um papel importante à erosão (Teixeira, J., 2006).

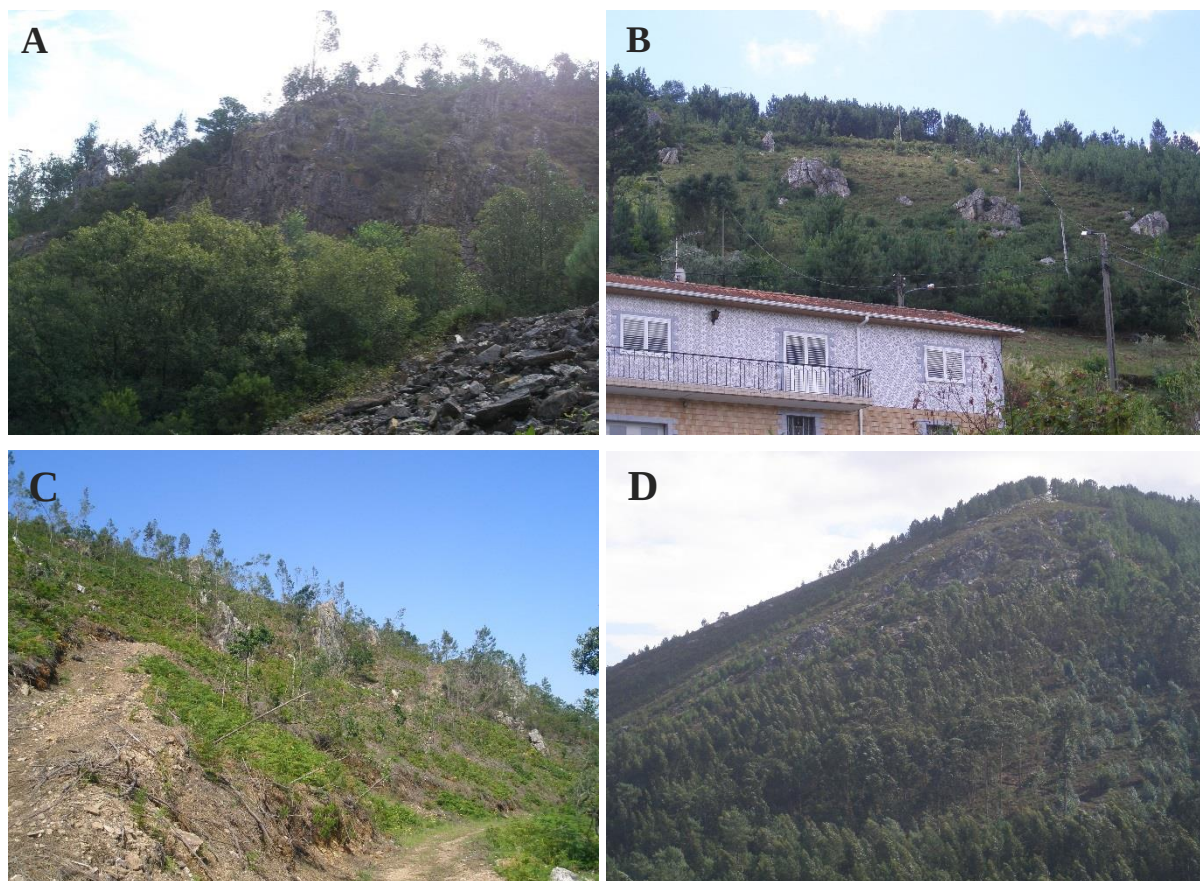


Figura 7 - Abruptos rochosos. A) Alto de S. Adrião (647m). B) Alto de S. Domingos (423m). C) Alto de Pedorido (250m). D) Alto de S. Gens (329m).

Na unidade geomorfológica encostas do Douro e Paiva, o concelho de Castelo de Paiva apenas abrange a margem esquerda dos 2 rios. Apresentam vales muito encaixados, de vertentes abruptas e declivosas estão sujeitos a escavação na base, particularmente em

episódios de cheia extraordinária. Nestas encostas dominam as vertentes retilíneas que, por vezes, desenham concavidades. Estas margens côncavas atingem declives muito acentuados (superiores a 40°) e parecem denunciar a possibilidade de ocorrência de movimentos de vertente. Os segmentos menos íngremes encontram-se nos lugares do Castelo, no Porto de Sardoura, Gondarém e de Pedorido (Chaminé & Gomes, 2005).

A unidade morfológica rechãs e topos aplanados graníticos localizam-se nas áreas mais povoada do concelho. É constituída por um traçado de elevações onde se destacam vários retalhos aplanados. Estes retalhos ocupam o topo de elevações e definem patamares nas vertentes que designamos por rechãs. Os retalhos aplanados localizam-se em Fornos, Sardoura, Sobrado de Paiva, Vista Alegre, Oliveira do Reguengo, Espinheiro, Casal, Ladroeira e Bairros.

As rechãs de Fornos e de Bairros merecem destaque por estarem voltadas em para o rio Paiva, mas com exposição solar diferente. A de Fornos abre-se para Norte e a outra está orientada para Leste. A rechã de Fornos traça um hemicíclo, enquanto a de Bairros preenche diversos patamares das encostas da margem esquerda rio Paiva (Chaminé & Gomes, 2005). As vertentes nestes locais perfilham aspetos diversos, apresentando forte declive e estão rigidamente alinhadas.

As áreas contíguas às serras quartzíticas apresentam um traçado muito acidentado e caótico, tipo montículos de toupeira (Ribeiro et al., 1987a). Este modelado xistento ocupam a na maioria da área das freguesias, Raiva, Pedorido, Paraíso e Real. Estas elevações não apresentam um padrão espacialmente definido e são compostas globalmente por vertentes com fortes declives, com curvaturas convexas ou convexo-côncavas (Chaminé & Gomes, 2005). São fortemente entalhadas pela rede hidrográfica, o que revela a fraca permeabilidade dos xistos e a dominância da escorrência superficial em detrimento da infiltração. (Chaminé & Gomes, 2005). Por entre estes terrenos montanhosos surgem os vales muito encaixados com os rios Arda e Sardoura e seus afluentes terem traçados sinuosos. Nesta área é constituída pelas áreas deprimidas que ocupam os fundos de vale, a altitude baixa, o lugar de Nojões, Vales, de Santo Antão, Ribeiro, Real, Portela, ou a altitude mais alta, em Serradelo. A depressão de S. Antão é a maior, com fundo mais plano, possuindo bons solos para a agricultura (Chaminé & Gomes, 2005).

Capítulo 2 - Movimentos de vertente

A Working Party on World Landslide Inventory (WP-WLI), a partir da proposta de (Cruden, 1991) define movimento de vertente como “um conjunto de movimentos de descida ao longo de uma vertente, de uma massa de rocha, terra ou detritos”.

O estudo aos movimentos de vertente possuem diversos conceitos, no entanto a terminologia difundida a nível internacional é fundamentalmente anglo-saxónica. A necessidade de obter a terminologia rigorosa e uniformizada a nível internacional, neste estudo foi utilizado as classificações e conceitos definidos pela WP-WLI (WP-WLI, 1993a, 1993b). Neste seguimento, foram realizados trabalhos de enorme importância científica, (Cruden & Varnes, 1996) e (Dikau et al., 1996) para disseminar os critérios da WP-WLI, para a explicação das tipologias dos movimentos de vertente, estado e estilo da atividade, morfologia e dimensões do movimento da vertente.

Zêzere (1997) apresentou um trabalho de síntese sobre os conceitos relacionados com os movimentos de vertente e terminologias (Tabela 1), e abrangência das propostas, incluem sistematização dos movimentos em massa, que engloba os movimentos de terreno associados ao gelo e à neve, os movimentos de terreno, incluem-se fenómenos de subsidência (abatimentos e assentamentos) e expansão e retração de solos argilosos, os movimentos de vertente onde se incluem os desabamentos (rock fall), a expansão lateral (lateral spread), o balançamento (topple), as escodas (flow), os deslizamentos (slide) e movimentos complexos.

Tabela 1 - Abrangência das tipologias de movimentos de vertente, movimentos de terreno e movimentos de massa (Zêzere, 1997)

Terminologia	Abrangência
Movimentos de vertente	Desabamento Escoda Expansão Lateral Balançamento Deslizamento Movimentos Complexos
Movimentos de terreno	Movimentos de Vertente Subsidência (abatimentos; assentamentos) Expansão-retracção em solos argilosos
Movimentos de massa	Movimentos de Terreno Movimentos associados ao gelo e à neve

2.1 - Tipologia de movimentos de vertente

Neste estudo foi adotado a classificação e terminologia de movimentos de vertente definida pela WP-WLI (WP-WLI,1993) que foi realizada por um grupo de trabalho da UNESCO para uniformizar as terminologias internacionais (Tabela 2) que consideram 6 tipos principais de movimentos de vertente: desabamento, balançamento, deslizamento, expansão lateral, Fluxo/escoada e movimentos complexos, (WP-WLI, 1993a, 1993b) e a sua diferenciação é importante na determinação de suscetibilidade.

Tabela 2 - Principais tipologias de movimentos de vertentes definidas pela Working Party on World Landslide Inventory

Tipos de movimentos de vertente			Material afetado		
Desabamento (Fall)			Rocha	Detritos	Solo
Balançamento/tombamentos(Topples)			Rocha	Detritos	Solo
Deslizamento	Rotacional	Simples Múltiplos Sucessivos	Rotacional rochoso	Rotacional de detritos	Rotacional de solo
	Translacional (superfície rutura Planar)		Deslizamento de rocha	Deslizamento de detritos	Deslizamento de solo
	Translacional (superfície de rutura compósita)		Deslizamentos rochoso em bloco	Deslizamentos de detritos em bloco	Deslizamento de solo em bloco
Expansão lateral (Lateral spreads)			Rocha	Detritos	Solo
Fluxos/escodas (Flows)			Rocha	Detritos	Solo
Movimentos complexos			(Combinação de dois ou mais tipos de movimentos)		

Neste trabalho será dada mais importância aos desabamentos, tipologia de movimentos investigada na área de estudo.

O conceito de desabamento é definido como uma deslocação de solo ou rocha a partir de um abrupto rochoso, ao longo de uma superfície onde os movimentos tangenciais são nulos ou reduzido. Os materiais deslocam-se pelo ar, por queda, saltação ou rolamento, (WP-WLI,1993) (Figura 8). Nos desabamentos de rocha (rockfall), a forma das descontinuidades do bloco rochoso (fraturas e planos de estratificação) determina o tipo de superfícies de rutura.

Os fatores desencadeantes representam a explicação direta da instabilidade e determinam o ritmo temporal dos movimentos de vertente (Zêzere, 2005).

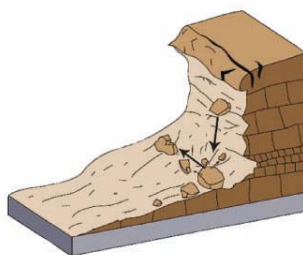


Figura 8 - Esquema do Desabamento adaptado de Cruden e Varnes (1996)

Como principais fatores desencadeantes dos desabamentos encontram-se os fatores naturais, a precipitação, o aumento das pressões da água no seguimento de infiltrações, a erosão do material vizinho nos pontos de apoio, decorrentes de chuva intensa, os sismos, a crioclastia, a termoclastia, da degradação química e alteração da rocha e como fatores biológicos o crescimento de raízes podem abrir mais fraturas no bloco rochoso (Flageollet & Weber, 1996). Como causas antrópicas são, a abertura de taludes para construção de estradas ou edifícios e escavações e construção de aterros que poderão ser impulsionadas pela força da gravidade exercida com peso da massa substancial do bloco rochoso, do solo ou dos detritos. Neste processo de desencadeamento origina uma queda brusca, ou seja muito rápida, potencialmente muito destrutiva (Varnes, 1978; Highland & Bobrowsky, 2008)

O declive da vertente tem uma relação direta com o movimento, é importante para a continuidade do movimento. Fatores como a geometria do talude, nomeadamente a inclinação, forma do bloco e a cobertura do talude condicionam a sua queda. Os movimentos tendem a ser muito rápidos (Figura 9) deste a rotura inicial até à imobilização da massa deslocada, em queda livre se o declive for superior a 70° , em saltação com declives entre 45° e 70° , e com declives inferiores a 45° os blocos desabados ou partículas de solo passam a ter trajetórias de movimentação denominados por rolamento (Cruden e Varnes, 1996).

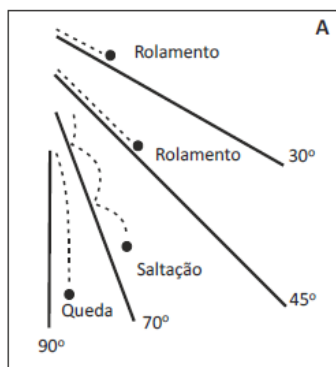


Figura 9 - Modo de deslocação de materiais rochosos em função do declive da vertente abaixo das áreas de rutura (adaptado de Ritchie, 1963 in Dorren, 2003);

As formas de rotura poderão ser planares, em cunha, em escadaria ou verticais (Flageollet & Weber, 1996). Na literatura científica alguns autores fazem distinção entre queda de blocos isolados ou em grupo e queda de blocos de grandes dimensões. A deslocação dos blocos pela vertente é controlada pela forma e dimensão do bloco, pelo ângulo das facetas de terreno onde ocorre o impacto e pela orientação, pela deformação e estado da rocha ou solo e pela absorção do impacto pelo coberto vegetal (Flageollet e Weber, 1996), visível na figura 10.



Figura 10 - Desabamento com aprisionamento de blocos pela vegetação na base do afloramento quartzítico. (A) Alto de S. Domingos. (B) Alto de Pedorido.

O balançamento ou tombamentos (topple), caracterizam-se pela 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, 1993) (Figura 11). Este movimento de vertente ocorre pela ação gravítica que as massas de solo ou rocha exercem na vertente localizado a montante da massa deslocada, pelas forças laterais exercidas pelos materiais e fluidos que preenchem nas fraturas e diaclases e pelo efeito que a água e o gelo podem exercer nas fraturas que existem na vertente (Cruden e Varnes, 1996).

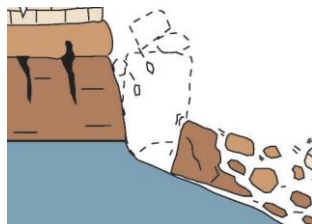


Figura 11 - Balançamento de Cruden e Varnes (1996) adaptado por Highland e Bobrowsky (2008)

O deslizamento (slide) caracteriza-se de acordo com (WP/WLI (1993b: 6-2), como um “movimento de solo ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de planos de rotura ou de zonas relativamente estreitas, alvo de intensa deformação tangencial”. Os deslizamentos dividem-se em rotacionais e translacionais de acordo com o tipo de rutura tangencial e das características do material afetado, a massa deslocada durante o movimento permanece em contacto com o material subjacente não afetado, apresentando graus de deformação bastante variáveis, consoante o tipo de deslizamento” (Zêzere, 2000).

Os deslizamentos rotacionais acontecem ao longo de superfícies de roturas curvas e côncavas e principalmente em materiais homogêneos (Cruden e Varnes, 1996) em forma de parabólica (Figura 12). A superfície de rutura e do cisalhamento é circular, em forma oval, com pouca deformação interna da massa deslocada (Buma & Van Ash, 1996a; Cruden e Varnes,

1996). Os deslizamentos podem ser simples, múltiplos e sucessivos e a sua identificação no campo é facilitada por elementos morfológicos característicos deste movimento.

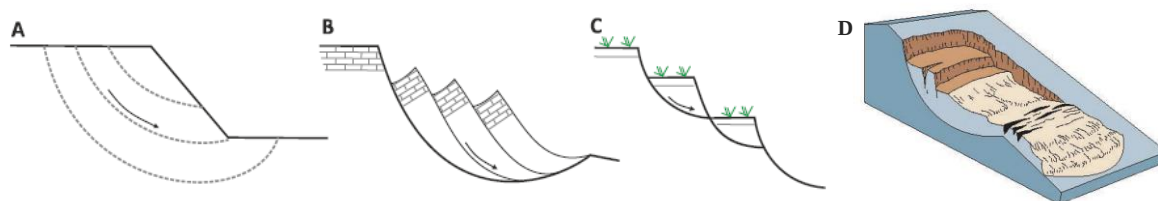


Figura 12 - (A) Deslizamento simples. (B) múltiplo. (C) sucessivo. (adaptado de Hutchinson, 1988) (D) Deslizamento rotacional de Cruden e Varnes (1996)

Os deslizamentos translacionais com rutura planar associam-se e verificam-se ao longo de uma superfície de rutura planar ou pouco ondulada, sendo que a massa deslocada projeta-se para mais longe da superfície do deslizamento. Este movimento resultam ao longo de superfícies fragilizadas com a existência de descontinuidades (falhas, fraturas), contatos litológicos, diáclases e planos de estratificação (Cruden & Varnes, 1996)

Os deslizamentos não rotacionais com superfície de rutura compósita (Figura 13), encontram-se na transição entre os deslizamentos rotacionais e os translacionais de rutura planar (Zêzere, 1997). A superfície de rutura apresenta uma cicatriz principal abrupta, aplanada em profundidade e na sua frente verifica-se inclinações em direção da cabeceira (Cruden & Varnes, 1996).

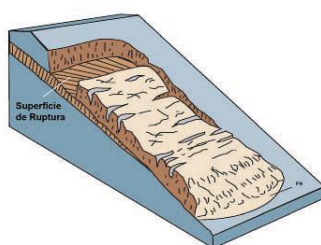


Figura 13 - Deslizamento translacional de Cruden e Varnes (1996)

A expansão lateral (lateral spreading) é explicada como uma “extensão de um solo coesivo ou massa rochosa combinada com uma subsidência geral da massa coesiva fraturada do material subjacente mais brando (Figura 14). Na superfície de rutura não se confirma um cisalhamento intenso, pode resultar da liquefação ou extrusão e escoada do material brando subjacente” (WP/WLI, 1993b:6-2). A expansão lateral em rocha é um processo com uma movimentação muito lenta, enquanto na expansão lateral em solos é um mecanismo extremamente rápido.

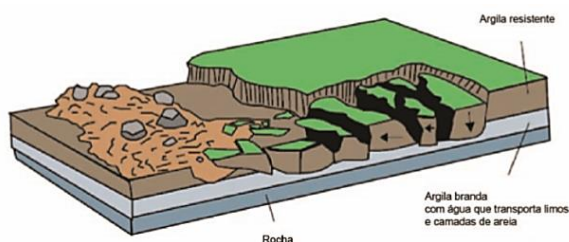


Figura 14 - Esquema da expansão lateral de Cruden e Varnes (1996)

O fluxo ou a escoada (flow) associa-se a um “movimento com superfícies de tensão tangencial são efémeras e frequentemente não preservadas (Figura 15). A distribuição das velocidades na massa deslocada assemelha-se à de um fluido viscoso” (WP/WLI, 1993b: 6-2). Apresenta grande número de tensões em toda a massa afetada, levando a uma grande deformação interna dos materiais e a diferentes velocidades na sua maioria superiores junto à superfície (Carson & Kirkby, 1975). Envolvem diferentes tipos de materiais e tem origem em bloco muitos fraturados. Os fluxos podem ser de 3 tipos, de rocha, de lama e de detritos. Os fluxos em rochas são deformações gravíticas, que afetam blocos rochosos estratificados nas vertentes montanhosas (Zêzere, 1997).

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 á base da vertente, por ação da força da gravidade (Corominas et al., 1996). Geralmente são movimentosmuitos rápidos e destrutivos (Gomes, 2006), desencadeados por precipitação intensa e controlado pela topografia da vertente.

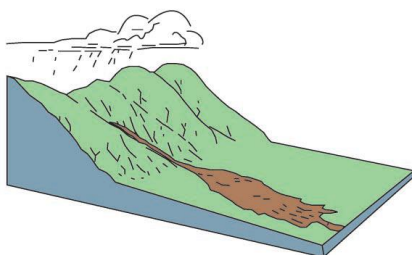


Figura 15 - Esquema de fluxo ou escoada de Cruden e Varnes (1996)

Os movimentos complexos associam a combinação de dois ou mais tipos de movimentos (Varnes, 1978). Este tipo de movimentos acontece naturalmente pois existem fatores e mecanismos a intervirem no decorrer do movimento e os materiais alteram-se. O movimento pode começar com queda de blocos, que em virtude da queda podem fragmentar-se e logo de seguida pode transformar-se num fluxo de detritos e são transportados ao longo de uma vertente.

Capítulo 3-Metodologias

3.1 - Métodos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente

O modelo conceptual de avaliação da suscetibilidade implica a determinação espacial da probabilidade de ocorrência de movimentos de vertente, essencial para a predição do “Onde?”, previsão da ocorrência de novas áreas instáveis (Guzzetti et al., 1999). Neste estudo a suscetibilidade corresponde à incidência espacial do perigo, que representa a propensão de uma área para ser afetada por um determinado perigo (desabamento), em tempo indeterminado, avaliada com recurso a fatores de predisposição para a ocorrência dos processos, não contemplando o seu período de retorno ou a probabilidade de ocorrência (Zêzere, 2010). Para efetuar uma avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente aplica-se um conjunto de métodos e técnicas, que destinam-se a prever o evolução da instabilidade, alguns destes métodos tem aplicação local, com dados detalhados, outros destinam-se a grandes áreas, com escala pequena com base em modelos de análise, (i.e, regional e municipal).

Atualmente o modelo concetual de avaliação encontra-se estabilizado sendo adotado pela comunidade científica um conjunto de etapas uniformemente aceites, que foram melhoradas ao longo das últimas décadas. As fases observam a realização do inventário de movimentos de vertente, a definição da modelação da suscetibilidade e a validação. No entanto ainda existem algumas incertezas quais os melhores modelos preditivos (Van Den Eeckaut et al., 2010)

Os movimentos de vertentes deixam uma marca morfológica que possibilita o seu reconhecimento, classificação e daí obter cartografia. As condições que originam os movimentos de vertente através dos fatores de instabilidade, de forma direta ou indireta, são identificáveis, podendo ser registados e utilizados para construir modelos preditivos.

A conceção de um modelo de suscetibilidade é o objetivo principal de uma avaliação da suscetibilidade à ocorrência de um movimento de vertente. O modelo alcançado é o resultado de procedimentos com aplicação de uma metodologia, que daí é necessário um conjunto de métodos de avaliação. Neste sentido a avaliação à suscetibilidade origina a conceção de mapas de zonamento, onde a área de estudo é classificada com diferentes hierarquias de suscetibilidade, com relações estatísticas entre o inventário de fontes de movimentos de vertente e os fatores de predisposição. “Os métodos para hierarquizar os fatores de instabilidade de vertentes e atribuir os diferentes níveis de suscetibilidade podem ser qualitativos ou quantitativos e diretos ou indiretos” (Guzzetti et al., 1999).

Nos movimentos de vertente, os métodos de avaliação da suscetibilidade poderão ter uma abordagem direta, sendo esta subjetiva e dependem da forma de quem avalia a suscetibilidade sendo realizada de forma descritiva (qualitativa). Pela abordagem indireta que é essencialmente quantitativa, desenvolvem-se em diferentes etapas, geram estimativas numéricas ou probabilidade de suscetibilidade de ocorrência de movimentos numa área de estudo e apoiam-se nas leis da física e em relações estatísticas, para gerar cartografia com rigor. Os métodos avaliação da suscetibilidade podem ser divididos em diferentes categorias (Guzzetti et al., 1999), em cartografia direta, através do método geomorfológico e métodos heurísticos ou baseados em indexação, em cartografia indireta, através de análise de inventários de movimentos de vertentes, modelos matemáticos de base físicos ou geotécnicos e modelos estatísticos, nestes modelos encontra-se o método do valor informativo utilizado nesta investigação. O gráfico 1 apresenta um esquema simplificado das principais tipologias de métodos de avaliação da suscetibilidade geomorfológica.

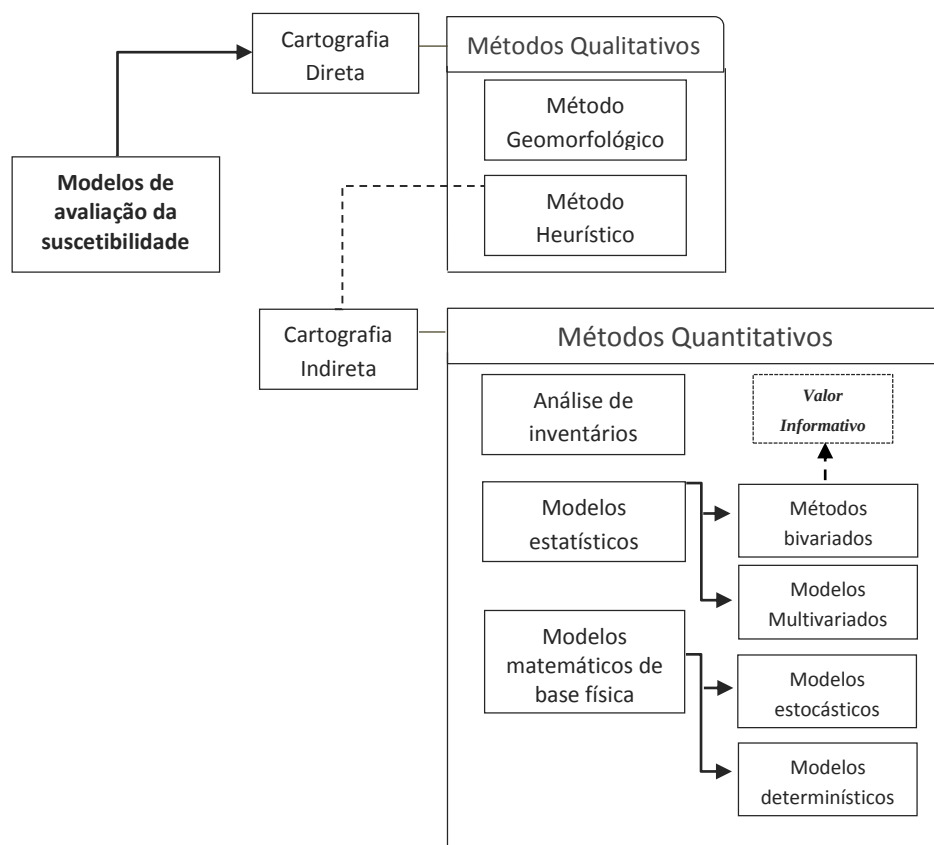


Gráfico 1 - Classificação das metodologias de avaliação da suscetibilidade (adaptado de Guzzetti et al 2009)

Este conjunto de metodologias de avaliação da suscetibilidade apoiam-se no pressuposto que os futuros movimentos de vertente têm uma maior probabilidade de ocorrer em condições

muito semelhantes que determinaram a instabilidade passada (Zêzere et al., 2004), através da aplicação princípio do uniformitarismo.

A utilização do Princípio do Uniformitarismo, indica que “o passado é a chave para o futuro”, neste sentido as relações entre a instabilidade passada e o conjunto de fatores de predisposição poderão ser usados para prever os futuros movimentos de vertente.

Neste seguimento, descrevem-se as características individualizando cada método, definindo as potencialidades e limitações.

Na avaliação por abordagem qualitativa e direta, também conhecida por método de cartografia direta (*experience driven method*), os métodos baseiam-se na cartografia geomorfológica de pormenor e dependem do conhecimento e capacidade de quem avalia, baseado na sua experiência e avaliação pessoal (Carrara, 1984) de reconhecimento do terreno atual e conseguir avaliar evoluções e consequências futuras de acordo com fatores de predisposição identificados. Neste sentido, neste método, poderão ser analisadas as condições únicas que causam instabilidade numa dada região, uma vez que é avaliado localmente. No entanto neste método poderá haver desvantagens, a abordagem é subjetiva e é complementada em todas as fases de uma investigação e deste modo para mesmo local poderão existir mapas de zonamento diferentes, o que causa incerteza na avaliação da suscetibilidade de diferentes investigações. Deste fato prende-se da não uniformização neste método das regras que avaliam a suscetibilidade e zonamento de uma área de estudo. A validação dos mapas de suscetibilidade por este método não pode ser efetuada de imediato, só poderão ser validados posteriormente quando ocorrerem novos movimentos de vertente na área em estudo (Piedade, 2009).

No entanto, a avaliação efetuada pela abordagem direta, por geomorfólogos com grande capacidade e experientes poderá resultar em mapas fiáveis, credíveis e robustos com grande aplicabilidade no território (Van Westen et al., 2000).

Na avaliação por métodos indiretos na determinação da suscetibilidade, baseiam-se nos fatores de predisposição ou fatores condicionantes envolvendo um conjunto de processos associados por fases distintas (Guzzetti, 2005). O zonamento é definido pela investigação das causas da instabilidade e é determinado uma avaliação quantitativa da suscetibilidade (Zêzere, 2010). Neste método tem que haver uma definição prévia da unidade de representação cartográfica ou unidades de terreno. Esta abordagem inicia-se com a realização do inventário da distribuição espacial dos movimentos de vertente de uma área de estudo, que será a variável dependente, seguidamente a identificação dos fatores de predisposição que estão diretamente e indiretamente correlacionados com a instabilidade da vertente, que serão as variáveis independentes. Cada fator de predisposição terá um peso ou uma contribuição na avaliação na

instabilidade das vertentes e classifica-se a área em diferentes graus de suscetibilidade (Guzzetti et al., 1999).

Os métodos heurísticos são sustentados pelo conhecimento assumido por parte dos investigadores das causas e fatores potenciadores da instabilidade da vertente e o seu controlo que exercem nos movimentos de vertente numa área de estudo (Zêzere, 2010).

Destaca-se que a aplicação do método heurístico faz-se por abordagem indireta, mas com uma avaliação qualitativa, estes dependem do nível de conhecimento, compreensão e análise do investigador sobre os processos da instabilidade geomorfológica ativa no terreno da área em estudo.

Deste modo aos fatores de instabilidade (mapas temáticos) são atribuídas ponderações e são hierarquizados, tendo como suporte no peso que é atribuído por quem avalia (investigador), com base na importância de possibilidade de causar instabilidade da vertente (Soeters & Van Westen, 1996). Este método apresenta como principais limitações, a validação só é possível quando ocorrerem novos movimentos de vertente, requer um conhecimento dos fatores de instabilidade e a subjetividade relativo à atribuição de ponderações dos investigadores aos fatores de instabilidade. Como vantagens, neste método as operações de modelação poderão ser realizadas na sua totalidade num SIG, podendo standardizar e administrar as informações, desde o início da aquisição dos dados até à fase final da análise.

No método com base na análise dos inventários de movimentos de vertente tenta prever os padrões futuros de instabilidade de vertentes com base na distribuição dos movimentos de vertente presente e passados. É possível realizar mapas por cada tipo de movimentos de vertente, comparar a sua distribuição espacial com diferentes mapas de factores de condicionante, calcular a presença ou ausência de um determinado tipo de movimento de vertente e estimar a área total afectada (Pereira, 2009).

Este método é indirecto e quantitativo e, a partir dele, podem realizar-se mapas de densidade de movimentos de vertente. Os mapas de densidade demonstram a percentagem de área instabilizada ou o número de ocorrências numa área de estudo (Guzzetti, 2005). Estes requerem a utilização de cartografia administrativa, (concelho, freguesias) e poderão ser uma base de trabalho para a utilização com outros métodos de zonamento da suscetibilidade a movimentos de vertente. Como limitações, a densidade de movimentos assumem-se contínua no espaço e não fornece uma estimativa dos movimentos de vertentes futuros.

Os modelos matemáticos de base física sustentam-se em leis físicas e mecânicas que controlam a instabilidade das vertentes, compreendem a conservação da massa e de energia ou o equilíbrio das forças e força cinética (Pereira, 2009; Montgomery & Dietrich, 1994., in Aleotti & Chowdhury, 1999). Nos modelos matemáticos de base física, existem os determinísticos e estocásticos. Os modelos deterministas fundamentam-se na caracterização física do fenómeno, enquanto os modelos estocásticos apoiam-se em estatísticas evidenciadas pelo fenómeno.

Os métodos geotécnicos são aplicados à análise da estabilidade de vertentes em pequenas áreas ou vertentes específicas, a uma grande escala. As propriedades físicas são quantificadas e aplicadas a modelos matemáticos específicos, permitindo calcular o Factor de Segurança. Normalmente, estes modelos são aplicados na engenharia de solos para estudos de estabilidade em vertentes específicas, para um determinado tipo de movimentos de vertente e em áreas homogêneas. Por isso, são bastante utilizados por engenheiros civis e engenheiros geólogos para a avaliação e cartografia da perigosidade a movimentos de vertente (Pereira, 2009).

O índice de estabilidade ou Factor de Segurança baseia-se num modelo geotécnico que requer informação detalhada sobre a geometria da vertente, sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno) e sobre a pressão de água nos poros (Aleotti & Chowdhury, 1999). É ainda necessária informação sobre a espessura do solo e sobre a profundidade e geometria do plano de ruptura potencial (Soeters & Van Westen, 1996).

Os modelos estatísticos são métodos de avaliação de suscetibilidade indiretos e quantitativos, podendo ser bivariados e multivariados. Possibilitam avaliar quantitativa e objetivamente a suscetibilidade, permitindo validar o modelo preditivo e avaliar a importância de cada fator de predisposição com as áreas instabilizadas (Guzzetti, 2005). Entre os fatores de predisposição são determinadas combinações com relações estatísticas que originaram as ocorrências no passado. Deste modo, como o passado é chave do futuro, os fatores serão os mesmos que irão prever a instabilidade no futuro.

Na análise estatística multivariada, subsiste uma ponderação dos fatores casuais que controlam a ocorrência da instabilidade, indicando a contribuição relativa de cada um destes fatores para o grau de suscetibilidade em cada unidade de terreno. Deste modo a análise fundamenta-se na presença ou ausência de condições ou processos de instabilidade em cada unidade de terreno (Süzen & Doyuran, 2004).

Neste método as análises estatísticas mais usadas são a regressão múltipla (Wieczorek et al., 1996) e a análise discriminante (Carrara et al., 1991).

Nos modelos de estatística bivariada cada fator é confrontado com a instabilidade, os valores de ponderação de cada classe de cada fator é definido com base na densidade de movimentos presente em cada classe (Aleotti & Chowdhury, 1999).

Neste modelo implica o cumprimento de etapas bem definidas, tais como:

1. Seleção e divisão em classes da cartografia (i.e., litologia, declives)
2. Realização do inventário de movimentos de vertente,
3. Identificação e caracterização dos fatores de predisposição que estão relacionados com a instabilidade das vertentes,
4. Sobreposição e avaliação das relações estatísticas entre os fatores de predisposição e o inventário;
5. Determinação da densidade dos movimentos de vertente por classe de cada um dos fatores de predisposição e cálculo das pontuações;
6. Atribuição aos mapas as pontuações com a distribuição espacial dos fatores;
7. Realização do cálculo final do valor de suscetibilidade para cada unidade de terreno identificado.

A grande vantagem deste modelo, o investigador que realiza a análise permite decidir quais os melhores fatores ou combinações de fatores e a importância de cada um, para uma boa avaliação da suscetibilidade (Van Westen et al., 2003). Como desvantagens, destaca-se que aplicação deste método está limitada quando o inventário está incompleto e a qualidade da cartografia, que de certa forma influenciam a robustez do modelo e a tendência de utilizar os mesmos fatores de predisposição ou utilizar aqueles que são facilmente disponíveis para a área em estudo.

Segundo Alleotti e Chowdhury (1999) e Süzen e Doyuran (2004), podem ser utilizados diversos métodos estatísticos para calcular os valores ponderados, como por exemplo o método do valor informativo, método do Weights of Evidence, regras da combinação Bayesiana, factores de certeza, método de Dempster-Shafer e a lógica difusa. Todos estes métodos podem ser aplicados em software SIG com pacotes de análise estatística.

Seguidamente apresenta-se o método estatístico bivariado aplicado neste trabalho, na modelação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos em Castelo de Paiva. O mesmo foi aplicado nos trabalhos de (Zézere, 1997) na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na região de Lisboa, (Pereira, 2009) na perigosidade a movimentos de vertente na região norte de Portugal e na modelação da suscetibilidade à rotura e propagação de desabamentos na Arrábida (Presas, 2012)

Esta técnica foi introduzida por Yan (1988) e Yin e Yan (1988) e implicou uma definição prévia das unidades de terreno e considerar um conjunto de fatores de instabilidade. Para este trabalho foram seleccionadas as variáveis, declives, exposições, litologia, curvatura das vertentes e uso do solo. Neste sentido na aplicação deste método houve numa relação entre cada classe de cada variável independente (variável X_i) e o inventário de movimentos de vertente, que resultou um score (pontuação) que é o valor informativo, obtido pela equação:

$$I_i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N}$$

Onde:

I_i – Valor informativo de classe i do fator de predisposição Z

S_i é o número de Unidades de terreno (pixéis instáveis) com desabamentos a presença da variável x_i ;

N_i é o número de Unidades de Terreno (células) em cada variável;

S é o número de Unidades de Terreno (células afetadas) com desabamentos na área de estudo;

N é o número de Unidades de Terreno (total das células) da área de estudo.

Deste modo quando o valor de I_i de uma variável é negativo, considera-se que a variável em causa não é favorável ou determinante á ocorrência de um movimento de vertente. Os resultados positivos mostram uma relação direta entre a presença da variável e as manifestações ou o surgimento de uma instabilidade. Neste sentido a instabilidade da vertente é mais acentuada quanto maior for o score de I_i (Yan, 1988 in Zêzere, 1997), denotando uma propensão à ocorrência do fenómeno.

O método do Valor Informativo possibilita a quantificação da suscetibilidade através da relação e da quantificação de um score mesmo em áreas (unidades de terreno) ainda não instabilizadas (Zêzere, 2002).

O Valor Informativo total de cada unidade de terreno (de cada célula) j é determinado pela seguinte equação:

$$I_j = \sum_{i=1}^m X_{ij} I_i$$

Onde:

I_j – Valor informativo da unidade de terreno j ;

m – Número de variáveis;

Xij é 1 ou 0 consoante a variável está presente ou ausente da Unidade de Terreno, respetivamente.

Quanto maior o valor final do VI, maior é a predisposição para a instabilidade dessa unidade de terreno (Yin e Yan, 1988).

A suscetibilidade das unidades de terreno varia na relação direta do valor informativo total, Ij.

Neste sentido houve procedimentos e metodologias na aplicação método valor Informativo na modelação suscetibilidade a desabamentos em Castelo de Paiva.

A aplicação do método do Valor Informativo na modelação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos seguiu as seguintes etapas (Pereira, 2009):

1. Definição das unidades de terreno numa base matricial;
2. Elaboração de matrizes binárias, a partir dos dados relativos às unidades de terreno, de um determinado tipo de movimentos de vertente;
3. Cálculo do Valor Informativo para cada classe de cada variável independente;
4. Cálculo do Valor Informativo final através do somatório dos valores informativos parciais, relativos às variáveis independentes presentes em cada uma das unidades de terreno;
5. Divisão final dos scores de Valor Informativo em classes de suscetibilidade, a partir da análise dos valores das unidades de terreno com movimentos de vertente (Yin e Yan, 1988 in Zêzere, 1997).

3.2 - Elaboração da Base de dados geográficos

Na conceção da Base de Dados Geográfica, previamente foi necessário todo um processo de planeamento. No processo preparação definiu-se o tipo de base de dados, quais os dados a armazenar, qual o sistema de referência a utilizar, a organização dos objetos, as relações a estabelecer entre os temas, as regras de topologia a definir e a definição dos domínios de cada classe. Na base de dados geográfica reuniu-se a seguinte informação:

1. Cartografia administrativa da área de estudo
2. Ortofotomapas da área de estudo
3. Informação vetorial e matricial das variáveis independentes a utilizar na modelação
4. Tabelas de dados geográficos.

A estrutura da base de dados geográfica foi preparada para permitir acrescentar novos dados e simplificar operações de consulta, ou seja, à medida que pretendo registar novas ocorrências a base de dados tem essa possibilidade. A base de dados geográfica da área em

estudo, foi estruturado com uma configuração a contemplar um conjunto integrado de informações ordenadas, em conformidade com temática específica, instabilidade das vertentes - desabamentos.

Para interpretar melhor a estrutura da base de dados foi realizado um esquema metodológico para descrever o processo inicial da conceção da base de dados geográfica e dados agregados, apresentado na figura 16.

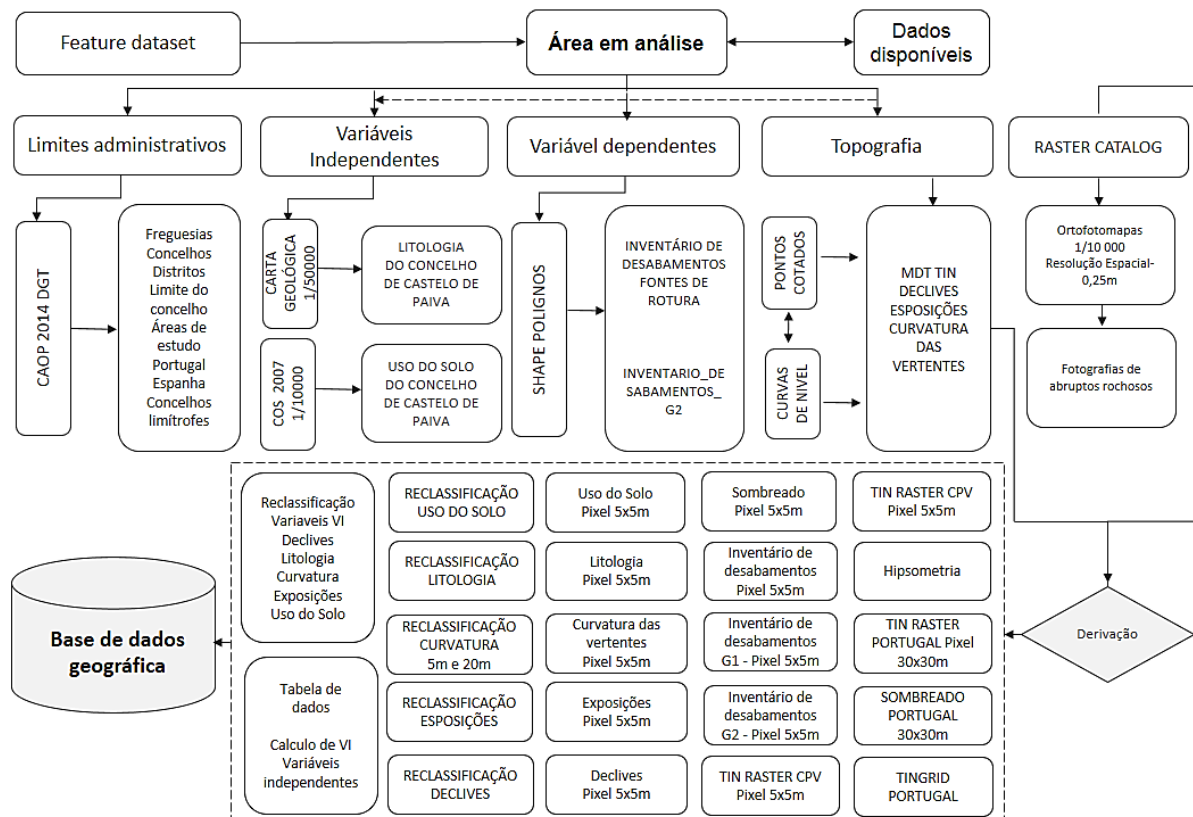


Figura 16 - Esquema metodológico na elaboração da base de dados geográfica

3.3 - Elaboração do inventário de desabamentos

A elaboração do inventário de fontes de desabamentos para a área de estudo teve como princípio fundamental a definição de um inventário de base geomorfológica multi-espacial.

O início dos procedimentos da modelação e validação da cartografia de suscetibilidade a ocorrência de desabamentos têm que estar bem planificados e estruturados de modo a concretizar os objetivos desta investigação. Neste sentido na execução deste trabalho, os dados recolhidos e processados foram utilizados em todas as etapas da modelação da ocorrência de desabamentos.

A informação obtida e pré-processada será utilizada nas várias etapas até à geração do modelo final e a sua validação.

As áreas de rotura vetorizadas são utilizados na análise da suscetibilidade à ocorrência de queda de blocos, bem como para produzir o modelo final e posteriormente para a validação dos resultados obtidos.

Os inventários de movimentos de vertente são uma base de trabalho insubstituível para a modelação da suscetibilidade e consequentemente para validação dessa modelação. Correspondem a uma importante etapa na avaliação da suscetibilidade, este suporte de dados que contém informações será utilizado como variável dependente na modelação.

Os dados do inventário são de extrema importância para observarmos e distribuição espacial dos fenómenos e analisar as suas principais características.

Na fase inicial do processo de preenchimento de ocorrências na base de dados geográfica no Arcatalog, foi elaborado um formulário/Ficha de inventário no Microsoft Access (Figura 17), para a anotação das características principais de cada limite de desabamento. Foram inseridos manualmente os dados na ficha de inventário e posteriormente na base de dados.

A ficha de inventário destina-se à identificação, localização e caracterização das fontes de desabamentos e das áreas de acumulação dos depósitos dos blocos e dos depósitos isolados. Os campos que construíram a ficha inventário foram o número de registo de campo, data do levantamento, ligação para fotografia da fonte de desabamento, ligação para mapas, tipologia dos limites do desabamento, número da folha da carta militar, freguesia, origem do bloco, coordenadas X e Y (ETRS 89), observações da localização, área de estudo, ocupação do solo, geologia do substrato, fonte e data do preenchimento.

Cada registo efetuado manualmente foi codificado e preenchida a informação relativa à variável dependente na base de dados geográficos, que foi inicialmente concebida. Neste ponto foram também adicionadas as feature datasets, feature class e seus domínios para guardar toda a informação que foi previamente estruturada. Criou-se ainda uma pasta para o arquivo fotográfico dos registos dos limites das fontes de desabamentos, que complementa a base de dados e auxilia a sua caracterização no gabinete e posterior acompanhamento de futuros projetos de investigação.

FICHA DE INVENTÁRIO DE DESABAMENTOS

IDENTIFICAÇÃO	
Nº de registo de campo	0
Data do levantamento	
Longitude (ETRS89)	
Latitude (ETRS89)	
FREGUESIA	Código
LIMITE DE DESABAMENTO Fonte de desabamento ☐ Depósitos de desabamentos ☐ Depósito isolado ☐	
Nº Carta Militar 1/25 000	Cota do limite
PARÂMETROS MORFOLÓGICOS Altitude da área-fonte 0 Orientação do Limite Área do limite 0 Exposição	
Inclinação da vertente na área fonte 0 FORMA DA VERTENTE NA ÁREA-FONTE Côncava ☐ Rectilínea ☐ Convexa ☐	
ORIGEM DA FONTE DE DESABAMENTO Natural ☐ Antrópica ☐ Natural/Antrópica ☐	
GEOLOGIA Monolítico ☐ Nº da carta geológica 0 Plurilítico ☐ Litologia Estrutura Estratificação ☐ Fratura ☐ Falha ☐	OCUPAÇÃO E USO DO SOLO Floresta Eucalipto ☐ Cultura de cereal ☐ Floresta Pinheiro ☐ Cultura de Pomar ☐ Floresta Outros ☐ Cultura de Horta ☐ Pastagem ☐ Matagal ☐ Inculto ☐
OBSERVAÇÕES SOBRE O LIMITE DE DE DESABAMENTO 	
Fonte	Data do preenchimento

Figura 17 - Ficha de inventário utilizada em trabalho de campo

A aquisição, manutenção e armazenamento dos dados segue critérios de qualidade para garantir o rigor e consistência da base de dados ao longo do tempo (Gaspar et al., 2004)

Posteriormente a base de dados no Microsoft Access foi ligada a um SIG através do ArcCatalog. Deste modo o Arcatalog passou a incorporar a informação alfanumérica e gráfica, conforme organização da geodatabase acima descrito. A organização da base de dados foi estruturada num formato que possibilita adicionar novas informações e facilitar operações de consulta. A figura 18 apresenta uma extrato da informação relativa à localização e caracterização na base de dados geográfica.

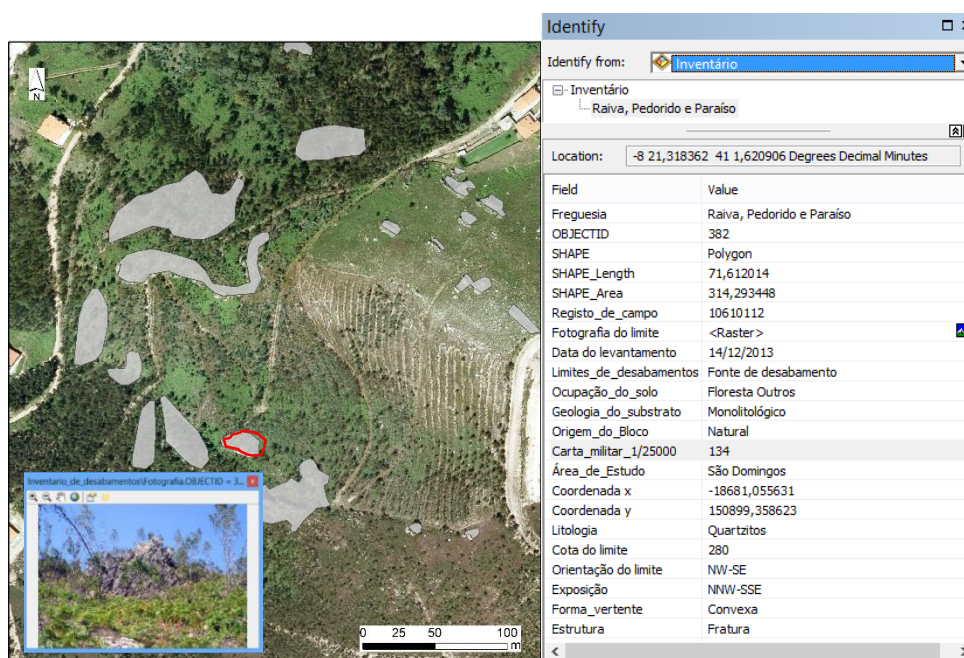


Figura 18 - Extrato da Base de Dados de fontes de desabamentos da área de estudo

Foram desenvolvidas por etapas a preparação do inventário das fontes de desabamento ou áreas de rotura do concelho de Castelo de Paiva.

No concelho de Castelo de Paiva aplicou-se a metodologia de elaboração do inventário de desabamentos à escala 1:10 000: uma indireta, baseada na observação e interpretação de Ortofotomapas e outra direta, fundamentada em trabalho e levantamento de campo.

A fase prévia ou a primeira fase da elaboração do inventário de movimentos de vertente, metodologia indireta, baseou-se na interpretação de Ortofotomapas digitais georreferenciados, obtidos em 2008 à escala 1:10 000 com uma resolução espacial de 0,25m. O objetivo principal é detetar, vetorizar abruptos rochosos e determinar áreas com interesse para definir estratégias para posteriormente ir para o terreno.

A interpretação dos Ortofotomapas possibilita uma imagem do terreno com características métricas e de escala semelhantes a um mapa, conjugada com uma escala de trabalho de análise municipal (1/10 000). Os ortofotomapas detêm uma resolução aceitável para a identificação de possíveis fontes ou áreas de roturas e de depósitos de desabamentos em todo o concelho, (25 cm). Os registos da primeira etapa foram muito demorados, mas com a persistência da minha interpretação identifiquei diversas fontes de desabamentos e áreas de acumulação de depósitos.

Os critérios utilizados na interpretação dos Ortofotomapas basearam-se na observação cuidada e refletida das imagens raster e procuraram-se as seguintes evidências:

1. Abruptos rochosos para identificar possíveis quedas de blocos;
2. Áreas de acumulação de depósitos de desabamentos;

3. Crescimento diferenciado da vegetação nas vertentes;
4. Interrupção da vegetação nas áreas de vegetação densa.

Durante a fase inicial dos registos de ocorrências no inventário, foram interpretados e delimitadas localizações de abruptos rochosos. Em certos casos as evidências são claras e com a presença de declives muito elevados, as mudanças e ausência da vegetação devido aos incêndios que alteraram de forma significativa a evolução das condições de equilíbrio dos blocos rochosos facilitaram a tarefa. Realça-se que os incêndios levaram a que os afloramentos rochosos ficassem mais expostos, potenciando a ação dos fatores, em especial a erosão superficial, o que conduziu à queda de blocos ao longo das vertentes. Porém não foi possível preencher a totalidade dos campos existentes nos formulários, porque algumas evidências de fontes e de depósitos não eram visíveis ou foram parcial ou totalmente apagadas por ação antrópica. A interpretação da paisagem, através da correlação entre a realidade de campo e a fotografia aérea permite uma delimitação prévia das unidades de limites de desabamentos, que permite um melhor preparação do trabalho de campo. As técnicas ou métodos de fotointerpretação utilizados para levantamento dos limites de desabamentos foram os seguintes:

1 - Análise de padrões

Os elementos padrões são indicativos de condições superficiais e subsuperficiais. (forma da fonte de desabamento, forma do terreno, aspetos erosivos, vegetação, tonalidade fotográfica). Segundo Goosen (1968), as características da superfície da terra, estão diretamente relacionadas com o solo. A análise dos elementos ou parâmetros fotográficos, numa imagem, é feita separadamente em diversos elementos como por exemplo: a dimensão, a forma, a sombra, os tons ou cores, a textura, o padrão e a localização.

Na figura 19 estão presentes os procedimentos utilizados na fotointerpretação:

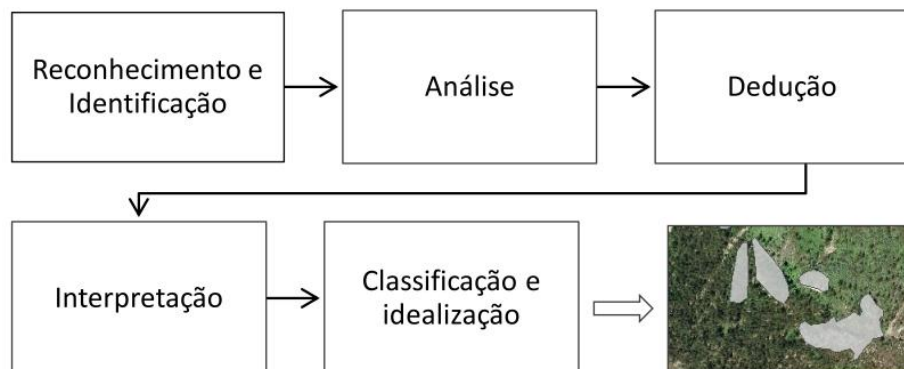


Figura 19 - Procedimentos na fotointerpretação das fontes de desabamentos

O Reconhecimento e Identificação surgem nas assimilações das observações dispersas que realizamos numa apreciação global da paisagem. A análise abrange ao estudo do conjunto, do global, para dele desagregar os elementos constituintes e estabelecer as relações com o todo. A Dedução, integra os objetos não diretamente perceptíveis. A dedução submete a um raciocínio. Esta fase foi a mais demorada, pois requeria conhecimentos da área para realizar correlações com os ortofotomapa.

Posteriormente foi efetuado a interpretação diretamente no ortofotomapa e após a individualização da observação, foi realizado a delimitação. Na parte final do procedimento da interpretação foi realizado a classificação e idealização, no entanto, ainda dependente pelo trabalho de campo, esta etapa pode ser considerada como a finalização do trabalho de gabinete.

Os abruptos rochosos que foram inventariados na primeira fase de reconhecimento com o auxílio dos ortofotomapas foram pré-validados com o orientador da investigação. Esta tarefa é muito importante, o que pode significar uma diminuição da duração no trabalho de campo. Os resultados desta fase, foi esclarecido que alguns abruptos que foram delimitados tinham que ser ajustados ou retirados.

Os resultados alcançados nestas duas primeiras fases da conceção dos registos no inventário de fontes de desabamentos, houve diferenças entre a primeira identificação na interpretação do ortofotomapa e a pré-validação. Inicialmente foram identificados 164 áreas de rotura interpretada através dos ortofotomapas, no entanto na pré-validação houve uma redução de 2 fontes de desabamentos.

Nesta fase o inventário das fontes de desabamentos é demonstrado numa tabela onde estão presentes todos os limites inventariados que foram interpretados por fotointerpretação, pré-validados. Na análise à tabela 3 verifica-se pouca diferença entre os limites de desabamentos que no método indireto, sobre os ortofotomapas foram identificados, com pré-validação (164 polígonos, no total).

Tabela 3 - Inventário de desabamentos sobre ortofotomapa e pré-validado

Limites de desabamentos	Interpretados pelo critério de fotointerpretação do ortofotomapa	Pré-Validação	Diferença	
			Nº	%
Fontes de rotura	164	162	2	1,02
Total				

Na figura 20 estão representadas exemplos de delimitações vetorizadas no decurso do preenchimento da base de dados geográfica no ArcCatalog na 1ª fase da inventariação com

recurso à fotointerpretação. Foram localizadas e delimitadas áreas de rotura, na base de dados geográfica foi atribuído o nome de fontes de desabamentos.

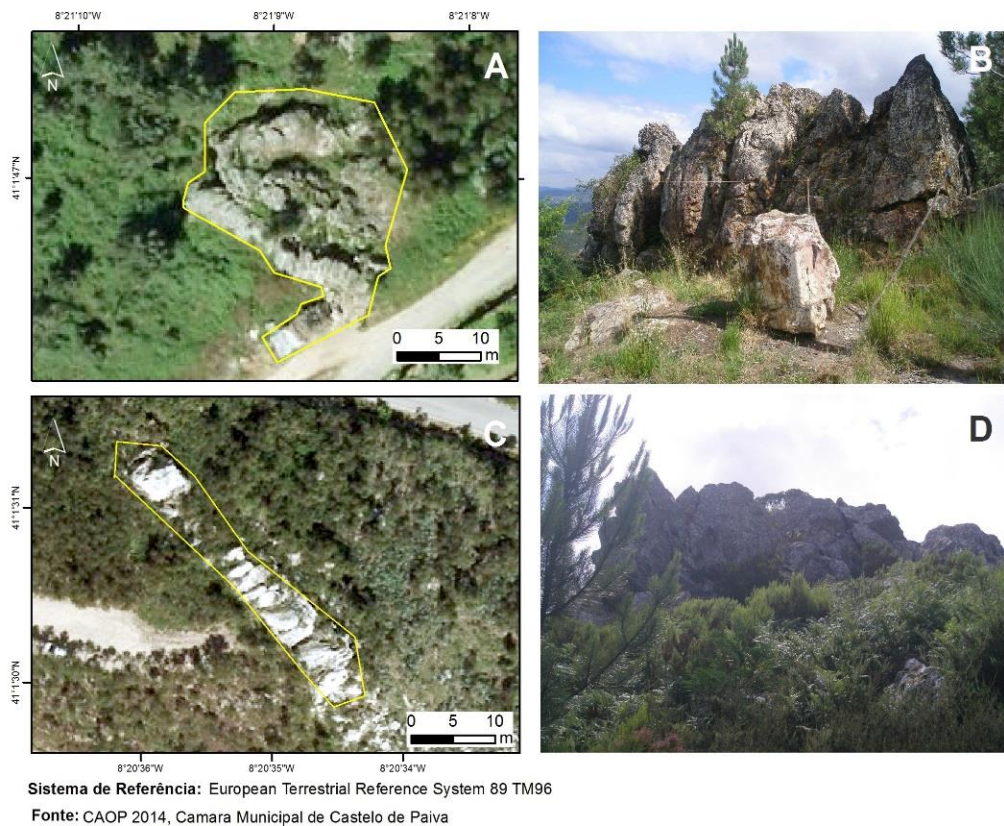


Figura 20 - Delimitações efetuadas. A) e C) Abrupto rochoso vetorizado por fotointerpretação, B) e D) Abruptos rochosos no Alto de S. Domingos.

O procedimento para a validação do inventário de fontes de desabamentos (metodologia direta) é de extrema importância para a análise da suscetibilidade. É de grande relevância no sentido para verificar se os abruptos rochosos ou áreas de rotura que foram bem identificados e se têm os seus limites bem assinalados e vetorizados para posteriormente estarem em conformidade para iniciar o processo de modelação como variável dependente e deste modo avançar para processamento das variáveis independentes para integração na modelação.

O trabalho de campo é imprescindível na validação do inventário, desta forma o reconhecimento de indícios de áreas instabilizadas identificadas de forma indireta têm de ser validados no local. A validação de campo, decorreu durante nos meses de Dezembro de 2013 e Janeiro de 2014, onde foram percorridas e observadas todas as áreas identificadas que foram vetorizadas na fase de interpretação e de pré-validação (Figura 21).



Figura 21 - Trabalho de campo. A) Alto de S. Domingos. B) Elevações em Pedorido. C e D) Alto de S. Gens

A interpretação de fontes de rotura com recurso aos ortofotomapas somente identifica abruptos rochosos de grandes dimensões, pelo que abruptos de pequenas dimensões têm que ser reconhecidos presencialmente, para não conferir erro ao inventário, seguidamente foi realizado o trabalho de campo. O inventário é parte fundamental na modelação e validação da cartografia de suscetibilidade à ocorrência de desabamentos, é imprescindível que se faça a validação.

A identificação de fontes de desabamentos presencialmente na área de estudo é de grande relevância e valia. No trabalho de campo confirmaram-se as situações que reconheci por fotointerpretação, contudo foram detetadas e apuradas novas áreas de rotura de difícil identificação que por reconhecimento através dos ortofotomapas com o auxílio da altimetria não foram possíveis constatar. Foram vários os aspetos que dificultaram o reconhecimento através da fotointerpretação, tais como, vários abruptos rochosos dissimulados sob a vegetação, abruptos rochosos encontrados em áreas com intervenção antrópica, nomeadamente com o rebentamento de taludes para a abertura de caminhos e estradas e nas práticas de reflorestação em data posterior aos do ortofotomapas.

A localização destas novas áreas de rotura encontradas no trabalho de campo registaram-se com recurso à ficha de inventário de desabamentos, posteriormente foram introduzidas novas informações na base de dados que corresponde à variável dependente (Inventário de desabamentos), como também foram vetorizados os novos limites no projeto SIG. Além da deteção de novas fontes de desabamentos, observei que alguns limites vetorizados tinham que ser ajustados, ou seja, por reconhecimento com recurso ao ortofotomapa a área do abrupto era de menor dimensão, que na presença no local foi possível verificar que detinha maior dimensão. Neste sentido houve fatores como a vegetação que interferiu no meu reconhecimento. Na figura 22 apresentam-se os exemplos A e B, de afloramentos de quartzitos de idade do ordovicico origina um declive local próximo de 30°, onde é possível identificar abruptos rochosos.



Figura 22 - Afloramentos rochosos de quartzitos. A) Alto de Pedorido. B) Alto de S. Domingos

O inventário final das fontes de desabamentos é demonstrado e explicado na tabela 4, onde estão presentes todos os limites inventariados que foram interpretados por fotointerpretação, pré-validados e validados em trabalho de campo.

Tabela 4 - Inventário final das fontes de desabamentos sobre o ortofotomapa, pré-validado e validado e trabalho de campo

Limites de desabamentos	Interpretados pelo critério de fotointerpretação do ortofotomapa	Pré-Validação	Validação em trabalho de campo
Fontes de rotura Total	164	162	166

A figura 23 apresenta o mapa de inventário de ocorrências de fontes de desabamentos que foram validadas em trabalho de campo.

Na distribuição espacial das fontes de desabamentos, são visíveis a sua concentração a longo de dois alinhamentos fundamentais, que correspondem, de Noroeste para sudeste com litologia de quartzitos. As cristas quartzíticas com abrupto rochoso encontram-se ao longo

destes alinhamentos, a primeira faixa a Norte, localizam-se nos altos de S. Paul (359m) e S. Gens (328m), na faixa Sul, no alto de Pedorido (247m), Alto de S. Domingos (421m), Paraduça (489m), Lobão (512m) e Alto S. Adrião (640m). Encontra-se algumas evidências de desabamentos nos granitos, a nordeste no alto de Bairros (250m) mas tem menos indícios de instabilidade.

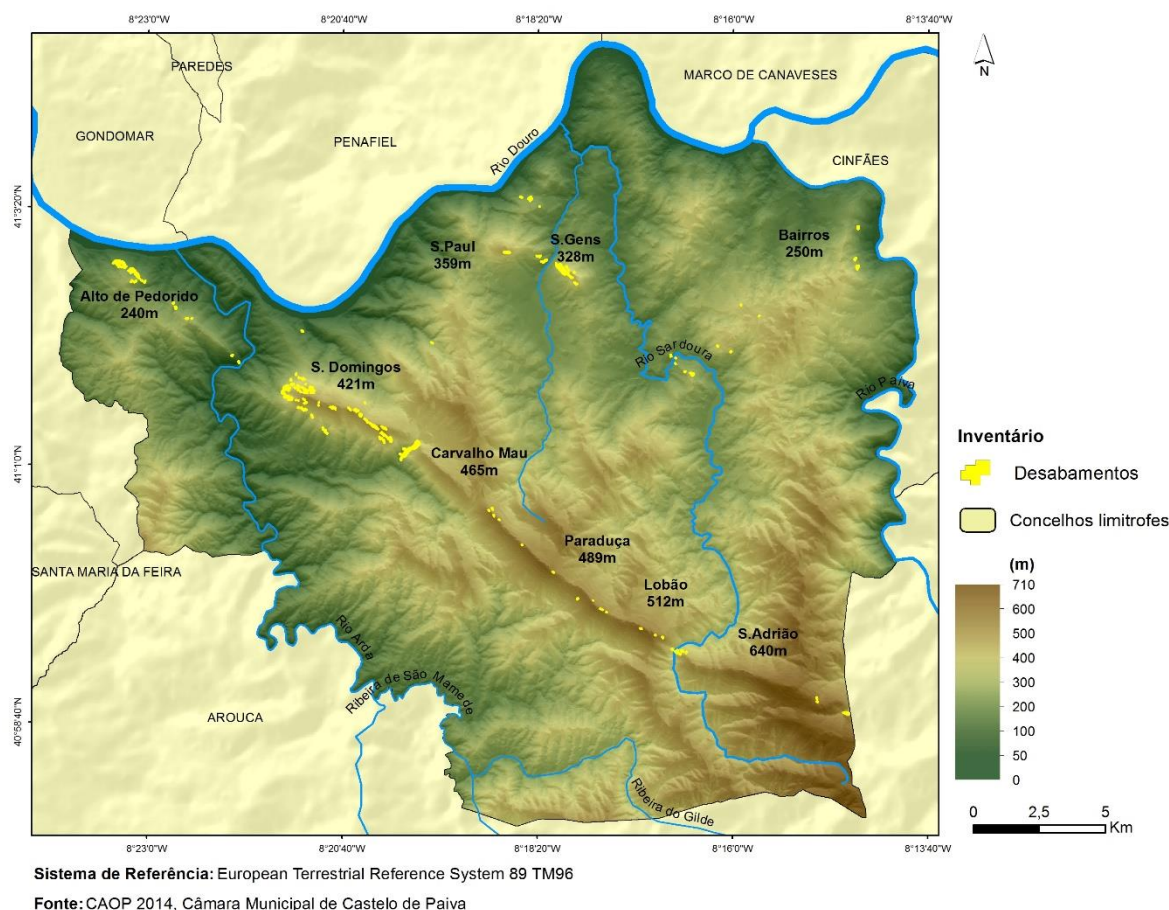


Figura 23 - Inventário com a totalidade das 166 fontes de desabamentos identificados a partir da interpretação de ortofotomapas e trabalho de campo.

3.4 - Bases cartográficas e processamento das variáveis utilizadas na modelação

A cartografia de base utilizada nesta investigação e no processamento das variáveis foi obtida em diversas fontes (Tabela 5). A base cartográfica, ortofotomapas digitais de 2008, à escala 1/10 000, com uma resolução espacial de 0,25m foram cedidas pela Câmara Municipal de Castelo de Paiva, georreferenciadas pelo Instituto Geográfico Português (IGP). Desta base cartográfica foi criado o tema do Inventário de fontes de desabamentos. A CAOP - Carta Administrativa oficial de Portugal de 2014 foi obtida recorrendo à Direção Geral do Território (DGT) preservando os metadados originais. O objetivo desta base cartográfica é a utilização dos limites administrativos da área de estudo.

A carta de ocupação dos solos de 2007 (COS2007) nível II foi cedida pela Câmara municipal de Castelo de Paiva produzida pelo IGP, à escala 1/25 000. A informação altimétrica vetorial foi fornecida pela Câmara Municipal de Castelo de Paiva à escala 1/10 000, possuindo as curvas de nível de equidistância de 10 metros.

Recorrendo às curvas de nível e de pontos cotados à escala 1:10 000 foi produzido o tema Modelo Digital de Terreno (MDT), do qual foi extraída informação derivada nomeadamente as exposições das vertentes, declives e curvatura das vertentes.

A seleção das variáveis independentes, estas utilizadas como fatores de predisposição são as que geram a instabilidade de vertentes e constitui uma tarefa essencial na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos. As variáveis selecionadas têm capacidade de indicar em que condições geraram a instabilidade no passado. O número de fatores predisposição utilizados é de acordo com a escala de trabalho, com metodologia de avaliação da suscetibilidade e disponibilidade e qualidade dos dados cartográficos.

A escolha das variáveis a utilizar como fatores de pré-disposição na área de estudo, teve em consideração o guia metodológico para a produção de cartografia de risco e para a criação de Informação Geográfica de Base Municipal, proposta de Julião et al (2009), em que definem as variáveis independentes a utilizar, o declive, formações superficiais, as exposições das vertentes, a curvatura das vertentes, o uso do solo e a litologia.

Nesta investigação e para esta área de estudo definiram-se como fatores de predisposição: a litologia, o uso do solo e 3 variáveis derivadas do MDT, o declive, exposições das vertentes e curvatura das vertentes. Estes fatores de predisposição inerentes ao terreno são frequentemente estáticos, condicionam o nível de instabilidade potencial das vertentes e determinam a variação espacial do grau de suscetibilidades do território à instabilidade (Zêzere, 2005). A avaliação da suscetibilidade realizada em SIG, facilita a combinação das variáveis independentes a utilizar como fatores de pré-disposição e as variáveis dependentes e reduz a duração de processamento. Para além da rapidez do processamento, a informação geográfica necessita de ter o mesmo sistema de referência, escala de trabalho, e deverá estar organizada numa base de dados geográfica com informação de cada variável utilizada na modelação. A avaliação da suscetibilidade, com base num conjunto de fatores de predisposição, requer que previamente seja definido o tipo de unidade de terreno (Terrain Mapping Unit) mais adequado (Guzzetti, 2005). A utilização de unidade de terreno de grande resolução, célula de 5 x 5 m, facilita a identificação de potenciais áreas instáveis com grande precisão espacial (Frattini et al. 2010). Nesse sentido para este trabalho optou-se pela resolução recomendada em função da escala, células de 5 x 5 m, o que permite uma maior aproximação à resolução máxima do

terreno. A vantagem principal destas unidades cartográficas estarem com o mesmo valor de células entre as variáveis (dependente e independente) é a criação de uma matriz que simplifica e facilita o processamento dos dados num projeto SIG.

O Sistema de coordenadas utilizadas em todo o processamento, construção da base de dados geográficas no Arcatalog e em todos os mapas foi o ETRS89 - Sistema de Referência Terrestre Europeu.

Tabela 5 - Base cartográficas utilizadas no processamento das variáveis

Base cartográfica	Fonte	Escala	Temas criados
Ortofotomapas digitais (2008)	Câmara Municipal de Castelo de Paiva Instituto Geográfico Português	1/10 000 Resolução espacial – 0,25	Inventário de desabamentos
Cartas militares N°134,135,144,145	Igeoe – Instituto Geográfico do exército	1/25 000	
Altimetria e Planimetria	Câmara Municipal de Castelo de Paiva Instituto Geográfico Português	1/10 000	MDT
			Declives Exposições das vertentes Curvatura das vertentes
Carta geologia de Portugal 13-B	Câmara Municipal de Castelo de Paiva Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)	1/50 000	Unidades litológicas
Carta de ocupação do solo Cos 2007	Câmara Municipal de Castelo de Paiva Instituto Geográfico Português	1/25 000	Classes de ocupação dos solos
CAOP - Carta administrativa de Portugal 2014	Direção geral do território (DGT)	1/25 000	Limites administrativos oficiais ao nível da freguesia, município e distrito
Referenciação Geográfica			
Sistema de referência	Elipsóide de referência	Projeção cartográfica	
PT-TM06/ ETRS89	GRS80 (Geodetic Reference System 1980)	Transversa de Mercator	

O pré-processamento das variáveis são processos de modificação da representação vetorial e matricial, no qual vai derivar uma nova informação, onde podemos classificar e reclassificar os dados. Esta fase prévia de pré-processamento tem a finalidade das variáveis dependentes e independentes estarem em conformidade entre si para poderem realizar análises, relações e cálculos estatísticos.

Neste sentido o esquema metodológico da figura 24, evidencia este processo com o objetivo principal de integrar estas variáveis (dependente e independentes) num projeto SIG, com a utilização da unidade cartográfica de representação definida neste trabalho (células de 25m²) em todas as variáveis.

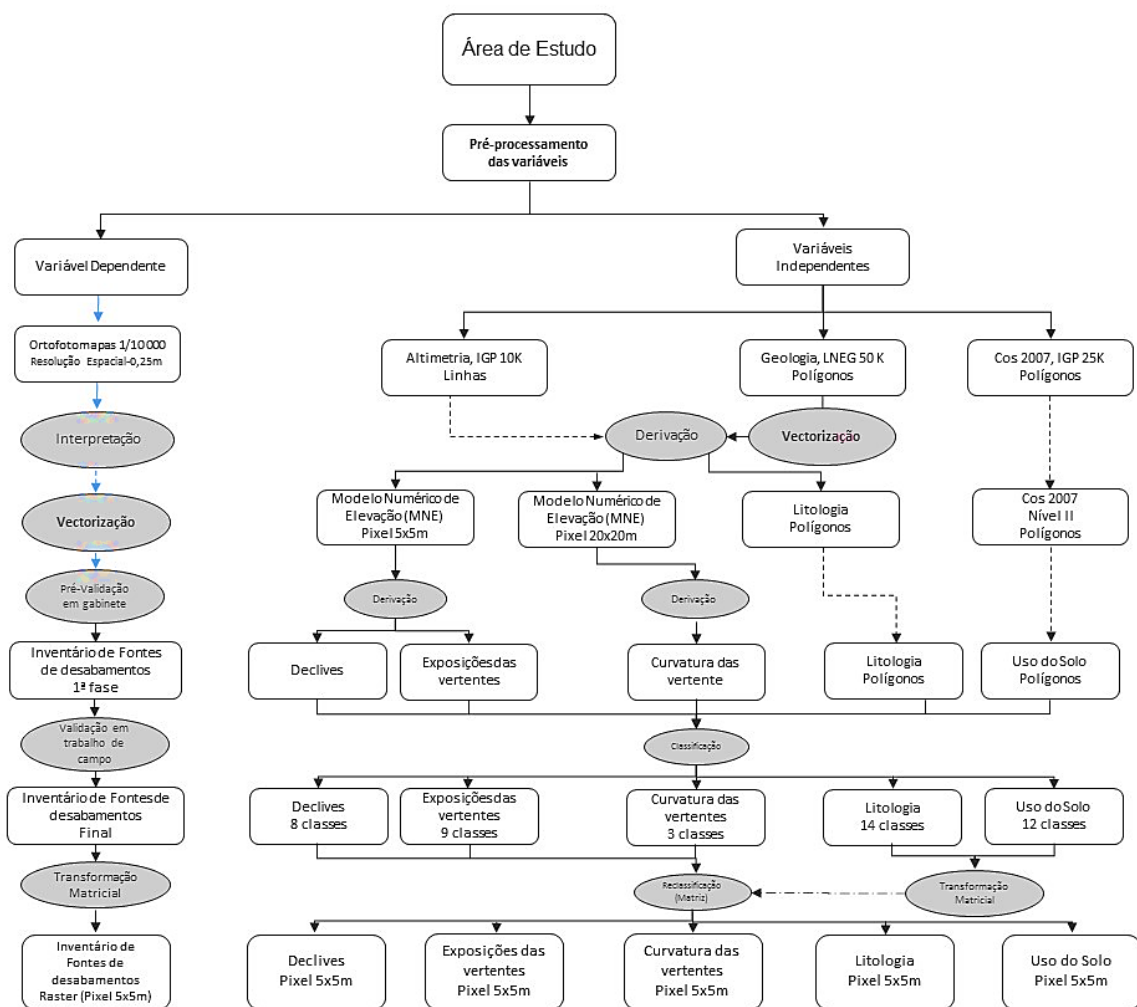


Figura 24 - Esquema metodológico praticado no pré-processamento das variáveis utilizadas na modelação e projeto SIG delimitadas à área de estudo

3.4.1 - Variável dependente

A variável dependente é a variável que se pretende avaliar e depende das variáveis independentes. O procedimento iniciou-se com a elaboração de uma base de dados geográfica com o nome de “Inventário de fontes de desabamentos” armazenada com referências cartográfica e geométrica das fontes delimitadas. A estrutura do registo do inventário foi elaborada numa base de dados, com a incorporação das cartas militares, ortofotomapas e fotografia de cada limite de desabamento. No projeto SIG foram vetorizados os limites correspondentes às fontes de desabamento, às áreas de acumulação traduzidas em depósitos de blocos e/ou blocos isolados, através da interpretação dos ortofotomapas e devidamente validado em trabalho de campo. Neste seguimento foi transformado o inventário que estava em estrutura de dados vetorial em estrutura matricial (Figura 25) com a unidade cartográfica

de representação estipulada nesta investigação, célula de 5m, ou seja, foi transformado a variável dependente em matriz com o pixel de 5x5m (Tabela 6).

Tabela 6 - Comparação da área instabilizada das fontes de desabamentos na conversão dos dados em formato vetorial para o matricial, em células de 5x5m (25m²)

Estruturas	Estrutura vetorial (m ²)	Estrutura matricial (m ²)	Diferença entre estrutura vetorial e matricial (m ²)	Diferença entre estrutura vetorial e matricial (%)
Área instabilizada				
Grupo total de fontes	95784,83	95550, 22	234,83	0,245

Sistema de Referência: European Terrestrial Reference System 89 TM06
 Fonte: Câmara Municipal de Castelo de Paiva

Inventário
 Fonte de desabamento-vetorial
 Fontes de desabamentos-matricial

Figura 25 - Conversão de fontes de desabamentos em talude de estrutura vetorial (polígonos a amarelo) para uma estrutura matricial (quadrados castanhos)

3.4.2 - Variáveis independentes

No processo de avaliação da suscetibilidade uma das etapas mais importantes é reunir informação cartográfica para a escolha dos fatores pré-disposição a utilizar na modelação da suscetibilidade, que irão determinar a propensão para a ocorrência de uma queda de blocos numa determinada área.

No decurso da modelação e validação à ocorrência de desabamentos sob a forma de quedas de blocos, foram seleccionadas e processadas 5 variáveis independentes. Neste subtema, são apresentadas e caracterizadas as cinco variáveis que foram ponderadas como fatores de predisposição para a modelação da suscetibilidade a desabamentos reclassificadas em pixéis de 5x5m.

Os fatores de predisposição da instabilidade geomorfológica são utilizados para construir o modelo de suscetibilidade na área de estudo. As variáveis foram pré-processadas conforme o fluxo de trabalho (Figura 24) e consideradas finalizadas para a integração no restante processo de modelação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos.

A topografia é utilizada para a análise da suscetibilidade a movimentos de vertente e é a principal fonte de informação. O MDT é um dos mais relevantes temas para o processo de análise da suscetibilidade, uma vez que é utilizado para produzir temas derivados com bastante utilidade. As representações digitais da superfície terrestre são uma fonte para a conceção de informação derivada, nomeadamente os declives, exposições, curvatura das vertentes, que confirmaram-se serem fatores condicionantes para o estudo da atividade de queda de blocos (Figura 26).

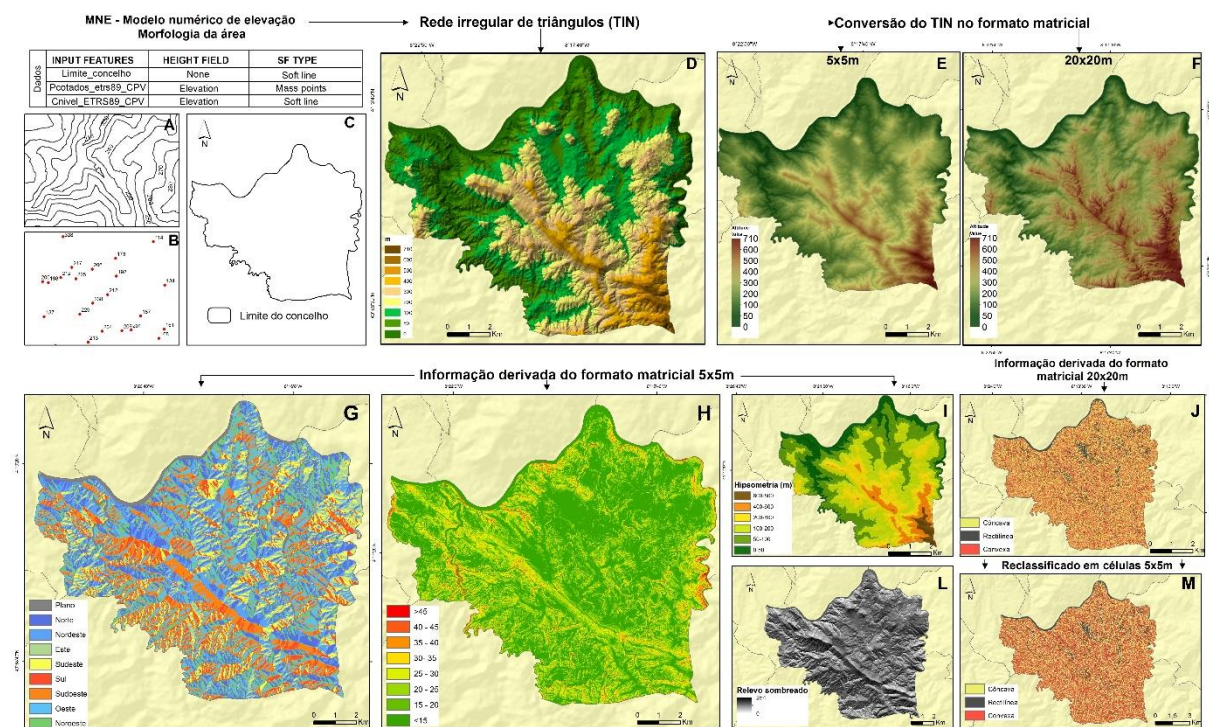


Figura 26 - Esquema metodológico na construção do MDT e informação derivada para representação da área de estudo. A) Curvas de nível. B) Pontos cotados. C) Limite de estudo. D) Rede irregular de triângulos. E) Formato matricial 5x5m. F) Formato matricial 20x20m. G) Exposições 5x5m. H) Declives 5x5m. I) Hipsometria. J) Sombreamento das vertentes. L) Curvaturas das vertentes 20x20m. M) Curvatura das vertentes 5x5m

Do formato matricial foi derivado duas resoluções, uma de células de 5x5m e outra de células de 20x20m. A partir do tingrid de resolução 5x5m extraí os declives e a exposição das vertentes, hipsometria e o sombreamento das vertentes e a partir do formato matricial 20x20m extraía curvatura das vertentes, para aproximar-se à realidade da vertente.

O número e os limites das classes de declive foram definidos tendo em consideração os limites de classes adotados em estudos similares na região de Setúbal na serra da Arrábida (Presas, 2012). O declive é um fator com forte influência na morfologia e na dinâmica das vertentes e tem envolvimento nos processos morfogenéticos, nos processos de desgaste e transporte das vertentes.

A informação sobre os declives (Figura 27), expressa em graus os valores da inclinação da superfície topográfica foi classificada em 8 classes, $<15^\circ$, $15^\circ-20^\circ$, $20^\circ-25^\circ$, $25^\circ-30^\circ$, $30^\circ-35^\circ$, $35^\circ-40^\circ$, $40^\circ-45^\circ$ e por último a classe $>45^\circ$. O limite da última classe ($> 45^\circ$) foi determinado pelo trabalho de Dorren (2003), que indica que abaixo dos 45° apenas é expectável a ocorrência de rolamento dos blocos na vertente, enquanto os movimentos de saltação e queda livre apenas se verificam com valores de declives superiores a 45° . Foi optado por utilizar o valor de referência de 15° para definir o limite da primeira classe, assumindo-se que abaixo deste valor não se reúnem condições para a ocorrência de desabamentos.

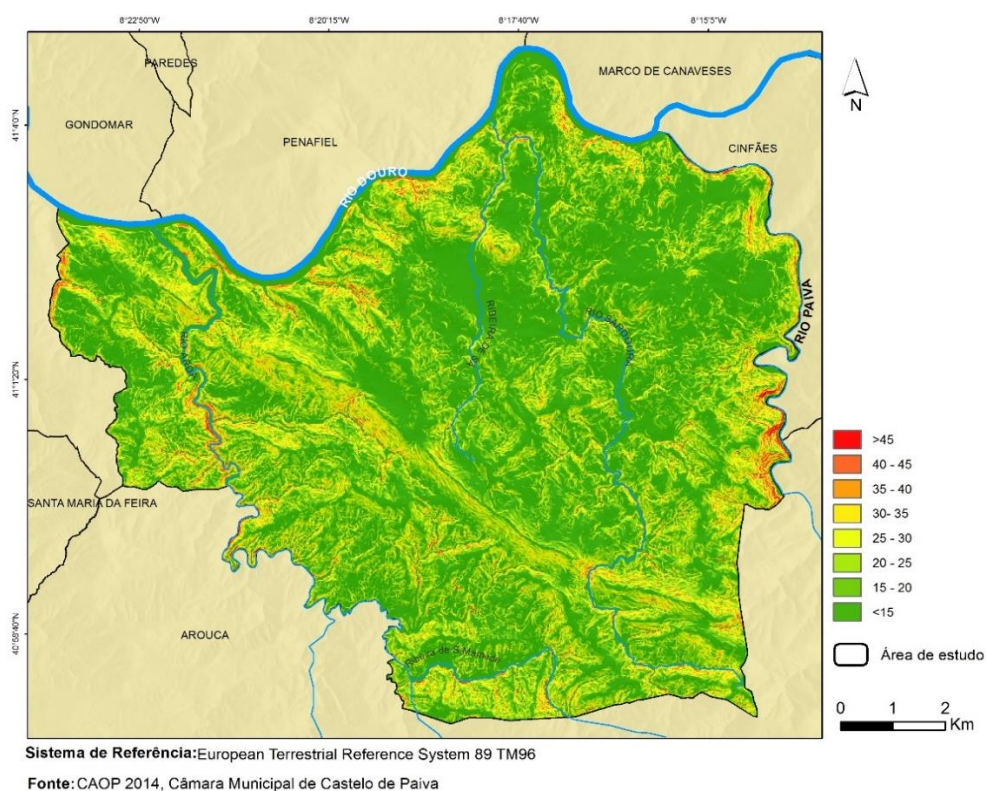


Figura 27 - Declives em graus do concelho de Castelo de Paiva

As características geomorfológicas da área de estudo influenciam as principais exposições das vertentes. Para obter o mapa das exposições é calculada direção do declive de uma célula em relação às células vizinhas.

Os valores das células das superfícies representam valores entre 0 e 360° . Na classificação das exposições efetuou-se a divisão em nove classes, com base nas orientações

em octantes (N, NE, E, SE, S, SW, W, e NW) em conjunto com a classe P referente às áreas planas ou sem qualquer orientação (Zézere et al, 2004).

Nesta variável são visíveis vários alinhamentos, coincidentes com os limites geológicos, muitos deles a denunciar o sistema de falhas existente (Figura 28).

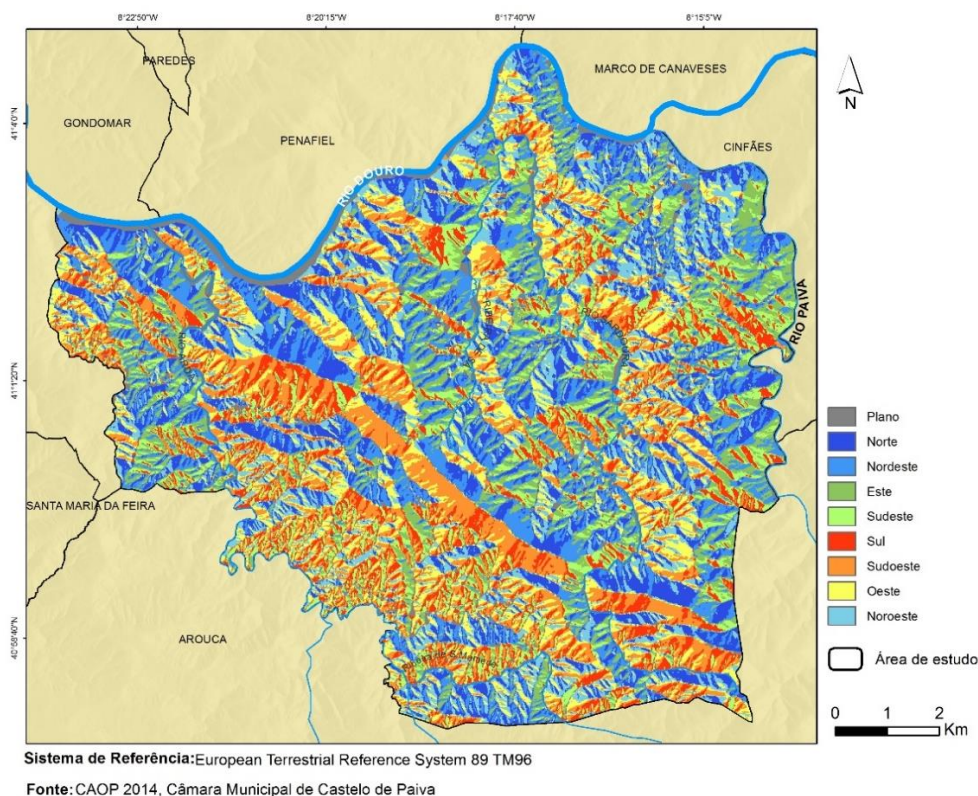


Figura 28 - Exposições das vertentes do Concelho de Castelo de Paiva

A partir do formato matricial 20x20m, modelo de terreno maior (400m²) foi extraído a curvatura das vertentes (Figura 29). A curvatura das vertentes, ao contrário da restante informação derivada do MDT com um pixel de 5 m, foi construído a partir de um MDT com um pixel de 20 m para ser possível determinar as variações da curvatura. Este tema posteriormente foi reamostrado em células 5x5m, para estabelecer relações estatísticas com os restantes variáveis independentes ou fatores predisposição e integrar o modelo. A classificação desta variável, resultou em 3 classes, que possibilitam o limite de separação entre vertentes côncavas, convexas, e planas ou retilíneas. O fator de pré-disposição curvatura das vertentes foi classificado em 3 classes (côncava, retilínea/plano e convexa) e possuem todos registos de fontes de desabamentos. As linhas de corte de cada classe foram definidas pelos limites -0,15 e 0,15. As vertentes côncavas, os valores utilizados foram abaixo de - 0,15, nas vertentes convexas os valores utilizados foram acima de 0,15, enquanto as vertentes planas ou retilíneas foram utilizados valores entre -0,15 e 0,15.

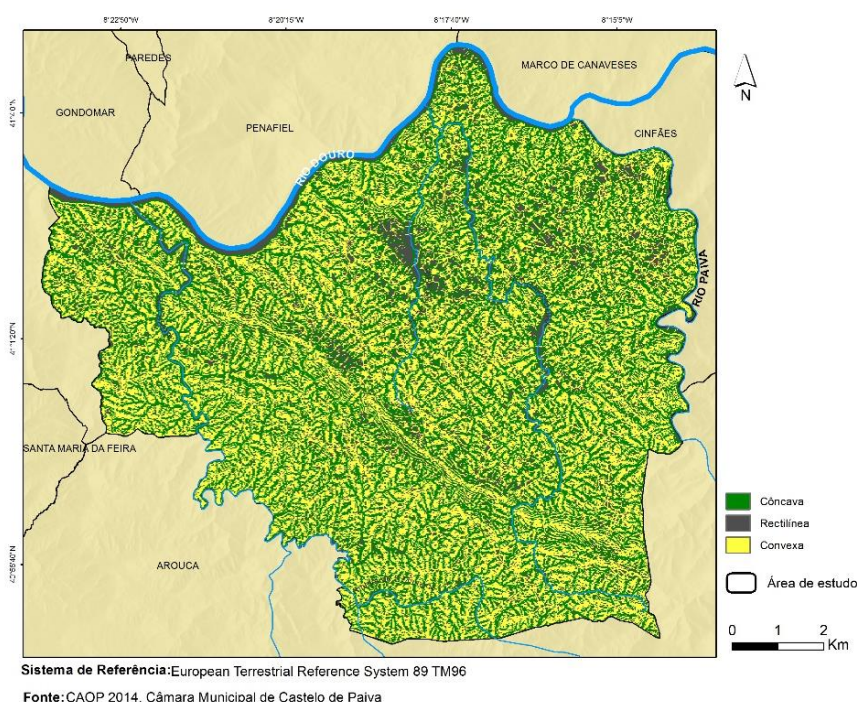


Figura 29 - Curvatura das vertentes do concelho de Castelo de Paiva

O uso do solo representa uma dos fatores que em termos de ação humana apresenta maior propensão para sofrer alterações ao longo dos tempos. Para desagregar as unidades de ocupação de solo, presentes na tabela 7, foi definido com base na informação registada na carta de ocupação do solo (COS 2007) do IGP, em estrutura de dados vetorial. Foi utilizada diretamente com a informação de nível II, que originou em sete classes de uso e ocupação do solo (Figura 30).

Tabela 7 - Unidades de ocupação do solo reclassificado a partir da classificação proveniente da COS'2007

COS 07 Nível II	Legenda da COS 2007	Classes de ocupação dos solos	Unidades de ocupação de solo(UOS)
1.1	Tecido Urbano	Territórios artificializados	UOS1
1.2	Industria, comércio e transportes		
1.4	Espaços verdes urbanos		
1.3	Extração de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção	Extração de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção	UOS2
2.1	Culturas Temporárias	Áreas agrícolas e agroflorestais	UOS3
2.2	Culturas Permanentes		
2.4	Áreas Agrícolas heterogêneas		
3.1	Florestas	Florestas	UOS4
3.2	Florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea	Vegetação arbustiva e herbácea natural e com pouca vegetação	UOS5
3.3	Zonas descobertas e com pouca vegetação	Zonas descobertas e com pouca vegetação	UOS5
4	Planos de água	Corpos de água	UOS7

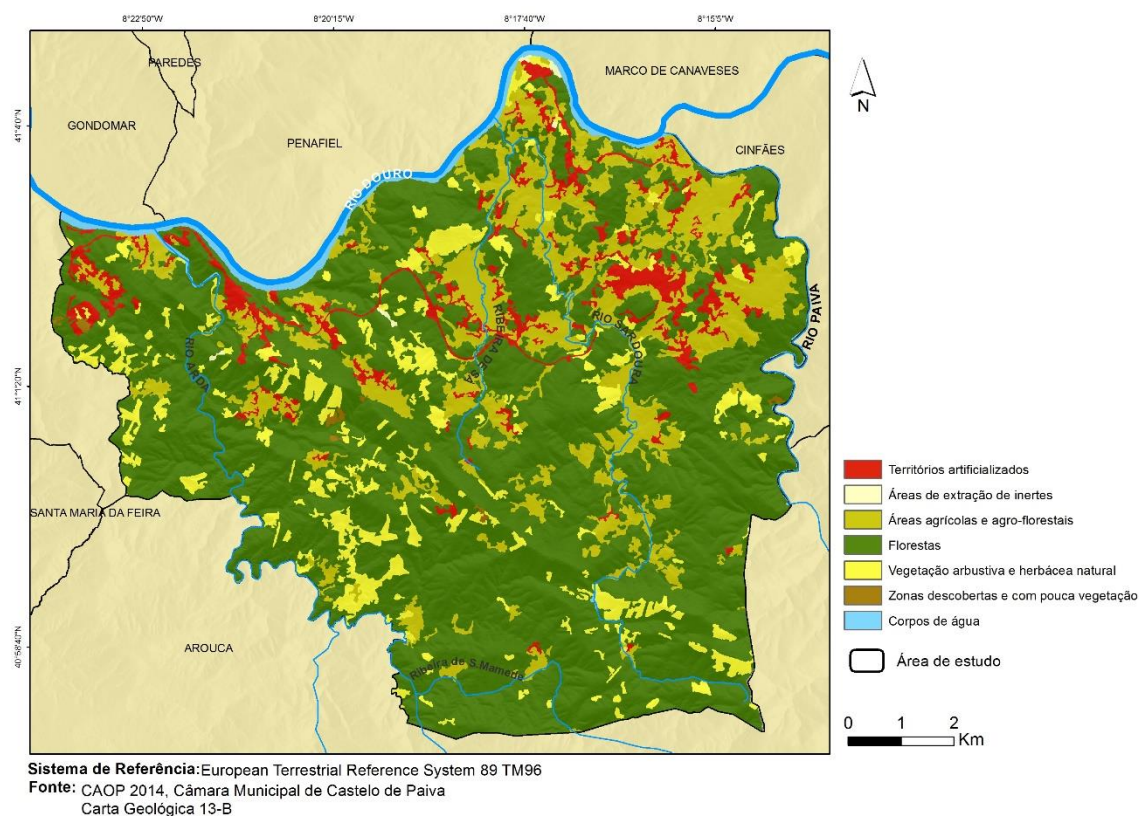


Figura 30 - Unidades de ocupação do solo no concelho de Castelo de Paiva

A litologia corresponde a um dos fatores de predisposição mais relevantes e mais utilizados na análise da suscetibilidade a movimentos de vertente (Chacón et al., 2006; Clerici et al., 2010).

No concelho de Castelo de Paiva foram definidos 9 tipos de unidades litológicas (Tabela 8). Esta informação foi obtida através da vetorização da Carta Geológica de Portugal, folha 13-B (Castelo de Paiva), à escala 1:50 000, executada pelos Serviços Geológicos de Portugal em 1964.

A desagregação efetuada na litologia foi definida e determinada pelo número de formações a aflorar no concelho em estudo (Figura 31).

A organização da informação geológica foi associada a unidades litológicas de acordo com a constituição e composição principal das rochas.

Tabela 8 – Classificação das unidades de litológicas

Geologia	Litologia	Classes de Litologia	Unidade Litológica (UL)
Aluviões Atuais	Aluviões	Aluviões	UL1
Areias e cascalheiras fluviais	Areias		
Formação Sobrido	Xistos, grauvaques, quartzitos	Xistos	UL2
Formação de Valongo	Xistos mosqueados do ordovicico		
	Xistos argilosos finos, ardosíferos, com fosseis		
Complexo xisto-grauváquico	Xistos Mosqueados	Conglomerados	UL3
	Xistos e grauvaques		
	Conglomerados	Conglomerados	UL3
Formação de Valongo	Corneanas Peliticas		
	Corneanas peliticas do ordovicico	Corneanas Peliticas	UL4
Rochas filonianas	Filões de quartzo		
Formação quartzito armoricano	Quartzitos	Quartzitos	UL6
Formação Santa Justa			
Granito profiroide, de grão grosseiro, essencialmente biotítico	Granito profiroide de grão grosseiro a médio	Granito profiroide de grão grosseiro a médio	UL7
Granodioritos e quartzodioritos biotíticos, com rochas básicas associadas	Granito Profiroide de grão fino		
Unidade S. Pedro Fins-Midões	Arcoses, xistos carbonosos	Arcoses, xistos carbonosos	UL9

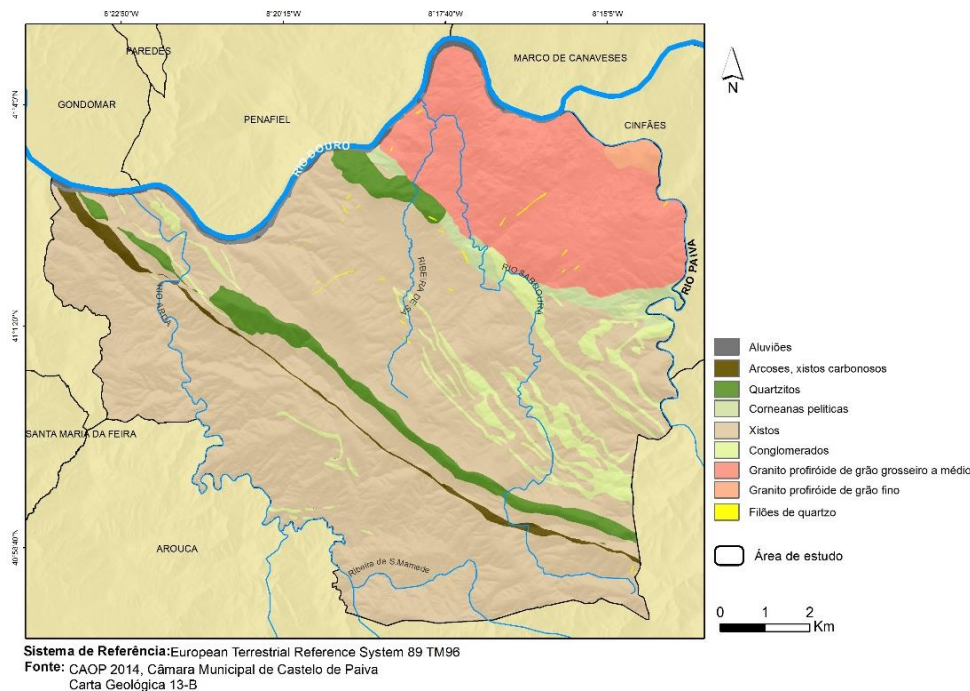


Figura 31 - Unidades de litologia do concelho de Castelo de Paiva

Na tabela 9 estão presentes os fatores de predisposição por classe utilizados na modelação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos. São apresentados os valores de área ocupada em Km² e o número de pixéis por classe de cada variável.

Tabela 9 - Variáveis e classes dos fatores de predisposição utilizadas na modelação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos

	Código	Classes	Número de Pixéis	Área ocupada (Km²)	Frequência Relativa %	Fontes de Informação
Declives	D1	<15	1962604	49,07	42,6	Modelo Digital do Terreno (Pixel=5m)
	D2	]15-20]	1015896	25,40	22,1	
	D3	]20-25]	795346	19,88	17,3	
	D4	]25-30]	469436	11,74	10,2	
	D5	]30-35]	221111	5,53	4,8	
	D6	]35-40]	90486	2,26	2,0	
	D7	]40-45]	33836	0,85	0,7	
	D8	>45	13103	0,33	0,3	
Exposições das vertentes	EXP1	Plano	301817	75,45	6,6	Modelo Digital do Terreno (Pixel=5m)
	EXP2	Norte	636827	159,21	13,8	
	EXP3	Nordeste	619831	154,96	13,5	
	EXP4	Este	476499	119,12	10,4	
	EXP5	Sudeste	417465	104,37	9,1	
	EXP6	Sul	433708	108,43	9,4	
	EXP7	Sudoeste	583779	145,94	12,7	
	EXP8	Oeste	570831	142,71	12,4	
	EXP9	Noroeste	561061	140,27	12,2	
Curvatura das vertentes	Curv1	Côncava (< -0,15)	1732176	43,30	37,6	Modelo Digital do Terreno (Pixel=5m) Interpretação Curvas de nível 1:10 000
	Curv2	Plano (-0,15 - 0,15)	747056	18,67	16,2	
	Curv3	Convexa (> 0,15)	2122496	53,06	46,1	
Uso do Solo	UOS1	Territórios artificializados	236245	5,91	5,1	COS`2007 Nível II
	UOS2	Áreas de extração de inertes	4785	0,12	0,1	
	UOS3	Áreas agrícolas e agro-florestais	799327	19,98	17,4	
	UOS4	Florestas	3094281	77,36	67,3	
	UOS5	Vegetação arbustiva e herbácea natural	359924	9,00	7,8	
	UOS6	Zonas descobertas e com pouca vegetação	10486	0,26	0,2	
	UOS7	Corpos de água	95173	2,38	2,1	
Litologia	UL1	Aluviões	35879	0,90	0,79	Cartageologia (1:50 000 13-B) Vetorização
	UL2	Xistos	3072493	76,81	67,41	
	UL3	Conglomerados	270383	6,76	5,93	
	UL4	Corneanas Pelíticas	88335	2,21	1,94	
	UL5	Filões de quartzo	5779	0,14	0,13	
	UL6	Quartzitos	206210	5,16	4,52	
	UL7	Granito profiroide de grão grosseiro a médio	792473	19,81	17,39	
	UL8	Granito Profiroide de grão fino	27976	0,70	0,61	
	UL9	Arcoses, xistos carbonosos	58658	1,47	1,29	

Capítulo 4 - Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos no concelho de Castelo de Paiva

No capítulo da avaliação da suscetibilidade a desabamentos no concelho de Castelo de Paiva o principal objetivo é a avaliação da suscetibilidade com recurso à modelação e validação e produção cartografia em ambiente SIG. A metodologia de elaboração do inventário de desabamentos foi apresentada no capítulo anterior, neste capítulo foram seguidos procedimentos metodológicos (Figura 32), apresentado uma análise à cartografia dos factores de predisposição da instabilidade de vertente, metodologias de modelação espacial da suscetibilidade e uma análise aos fatores mais importantes na definição dos resultados finais. Neste contexto estabelecem-se as técnicas envolvidas e procedimentos específicos que constituem os objetivos gerais para a avaliação e validação da suscetibilidade:

- Procedimentos e metodologias na aplicação de método de avaliação da suscetibilidade, o método quantitativo de análise estatístico, o VI;
- Avaliação das relações estatísticas entre a variável dependente, o inventário de fontes de fontes de desabamentos e um conjunto de fatores de predisposição;
- Avaliar a capacidade preditiva dos modelos de suscetibilidade com base em critérios de partição aleatória dos inventários de movimentos de vertente;
- Classificação da suscetibilidade com base nas curvas de sucesso e predição e obtenção de cartografia de suscetibilidade;
- Análise sensitiva aos fatores de predisposição no melhor modelo de suscetibilidade

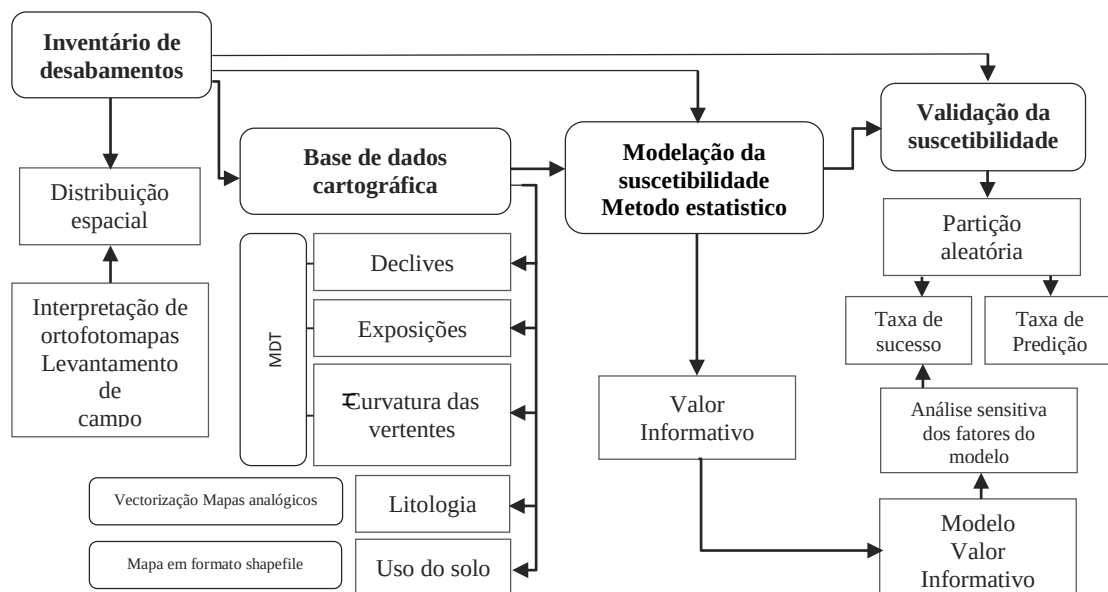


Figura 32 - Esquema metodológico de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos

4.1 - Fatores de predisposição

A análise dos fatores de predisposição foi realizada após reunir informação necessária para produzir cartografia, o MDT e informação derivada, uso do solo à escala 1:25 000 e litologia à escala 1:50 000.

Na análise das relações entre os desabamentos e um conjunto de factores de predisposição, as classes de declives com maior percentagem de fontes de desabamentos são as correspondentes a declives superiores a 25 graus, que ocupam 17,99 % da área de estudo. As 5 classes superiores a 25 graus definidas neste estudo, abrangem 73,39 % do total de fontes de desabamentos, neste sentido na área de estudo os desabamentos ocorrem especialmente nas classes com declives acima dos 25 °. A classe inferior a 15°, tem uma reduzida percentagem de desabamentos, com 7,01%.

O maior número de desabamentos inventariados não coincide obrigatoriamente com as áreas de maiores declives (Gráfico 2), comprovando a interferência de outros factores na instabilidade de vertentes e a área territorial é desigual entre as várias classes de declive.

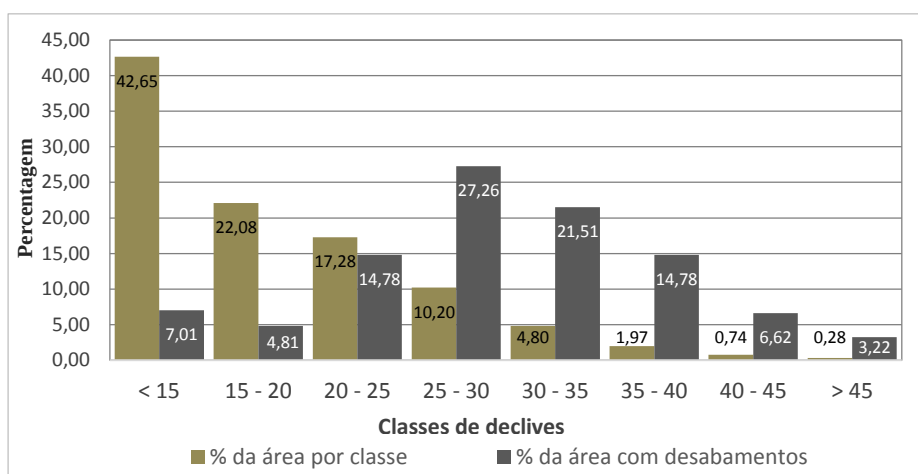


Gráfico 2 - Percentagem de área ocupada pelas classes de declive e respetiva percentagem de área total com desabamentos

As 9 classes ponderadas na exposição das vertentes, indicam que não apresentam grande variação em termos de representação espacial (Gráfico 3). As exposições das vertentes na área de estudo estão condicionadas pela disposição do relevo e pela tectónica. A classe com menor percentagem de área relativa corresponde à classe Exp1 (áreas planas) com 6,56 % da área total, enquanto as classes com mais representação espacial pertence às classes Exp2 (Norte) e Exp3 (Nordeste) com 13,84% e 13,47% respetivamente da área total. Na área de estudo os desabamentos predominam nas exposições a NW, W, e N, que representam, respetivamente, 23,05%, 21,90%, e 14,36% da área de estudo. A exposição da vertente NW é a que apresenta

maior percentagem de deslizamentos devido à disposição do relevo dominante que relacionam-se elevações essencialmente compostas por quartzitos, alinhados segundo a direcção NW-SE. As vertentes expostas ao quadrante Oeste (W, NW e SW) abrangem 55,65% dos registos de fontes de deslizamentos no concelho de Castelo de Paiva.

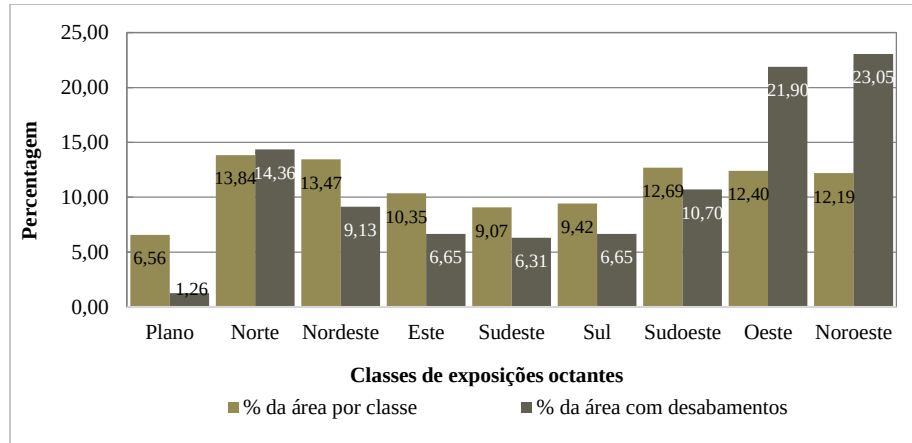


Gráfico 3 - Percentagem de área ocupada pelas classes de exposições de vertentes e respetiva percentagem de área com deslizamentos

Nas vertentes de curvatura convexa (curv3) encontra-se 63,74% da área com fontes de deslizamentos (Gráfico 4). Nas áreas com vertentes planas ou retilínea ainda se encontra uma percentagem de área com fontes de deslizamentos com 7,12%, correspondentes a áreas aplanadas nas altitudes mais acentuadas do concelho, possuindo 16,23% de área relativa no concelho.

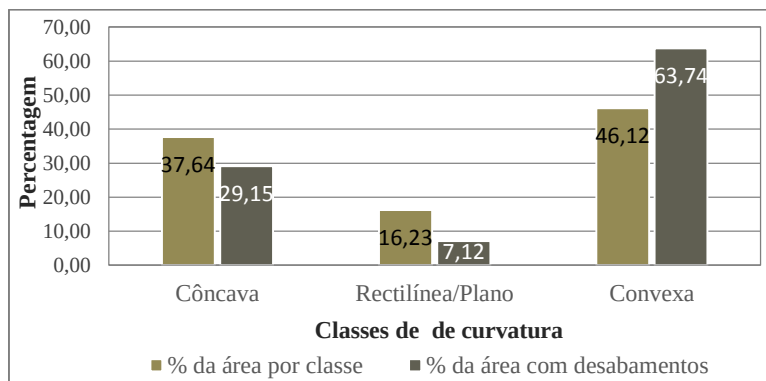


Gráfico 4 - Percentagem de área ocupada pelas classes de curvatura das vertentes e respetiva percentagem de área com deslizamentos

A informação sobre a ocupação do solo foi retirada Carta de Ocupação do Solo (COS 2007) do IGP, à escala 1/25 000 em estrutura de dados vetorial, mantendo-se atualizada para a área em estudo e foi utilizada diretamente com a informação de nível II, o que originou sete classes de uso do solo.

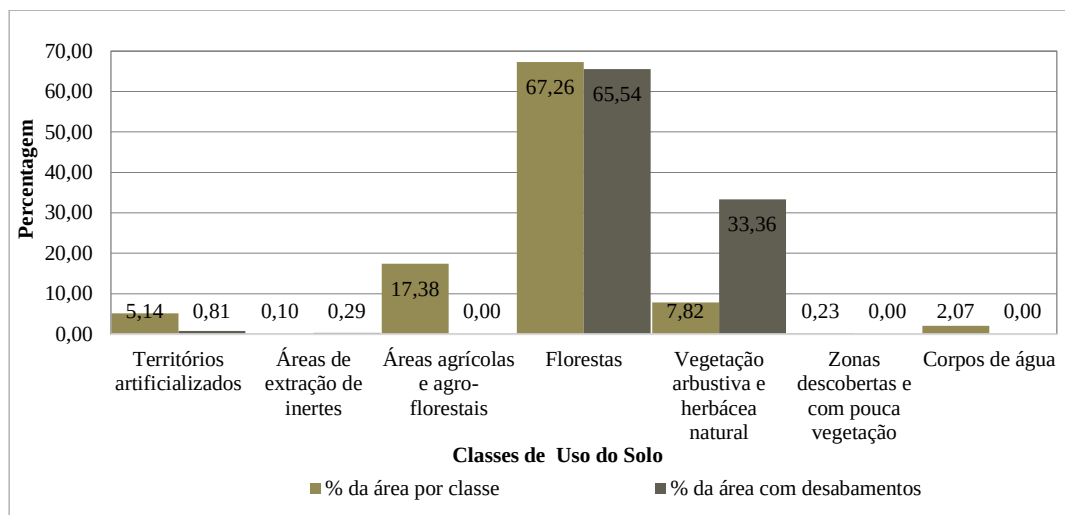


Gráfico 5 - Percentagem de área ocupada pelas classes do uso do solo e respetiva percentagem de área total com deslizamentos

As classes de uso de solo com uma maior percentagem de fontes de deslizamentos encontram-se nas florestas (Gráfico 5), ocupam 67,26% da área do concelho e são as que registam maior número de deslizamentos (65,54% da área instabilizada), seguido pela vegetação arbustiva e herbácea natural com valores de 33,36%. de área instabilizada, ocupando 7,82% de área. Na unidade de análise UOS1, pertencente á classe territórios artificializados, possui uma percentagem de 0,81% de fontes de deslizamentos, deveu-se à generalização da cartografia disponível do nível II da COS07 e os limites de fontes de deslizamentos serem coincidentes (Figura 33), entre por exemplo, com a classe florestas e com a classe vegetação arbustiva e herbácea natural.

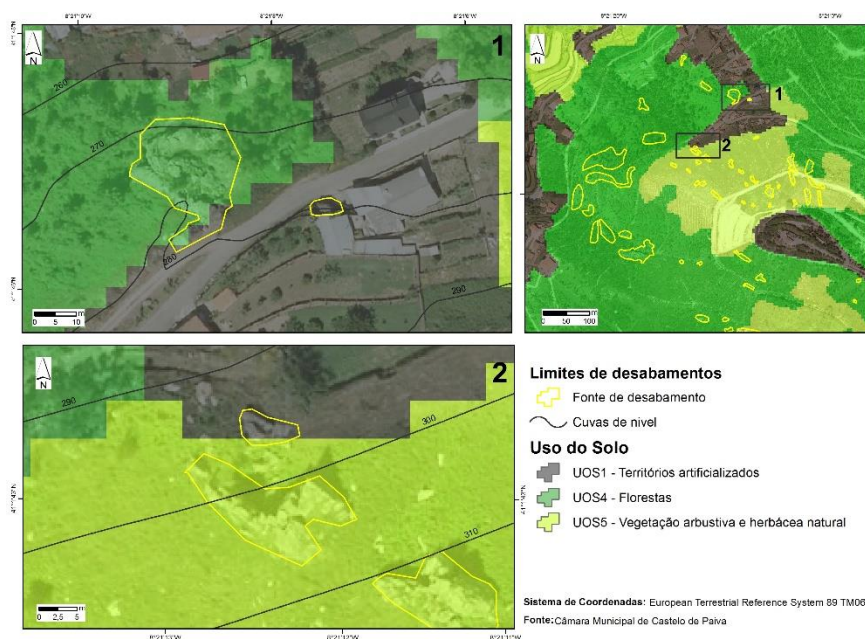


Figura 33 - Sobreposição das fontes de deslizamentos nas classes de territórios artificializados com as florestas representadas no nível II da cartografia COS07.

A litologia do concelho de Castelo de Paiva foi retirada e vetorizada através da Carta geológica de Portugal, folha 13-B, à escala 1:50 000.

No cruzamento das fontes de desabamentos com a litologia (Gráfico 6), verificou-se que 87,07% ocorrem em áreas ocupadas por quartzitos. Nas áreas dos granitos, 5,81% dos desabamentos ocorreram em afloramentos de granitos porfíroides de grão grosseiro a médio, nos xistos verifica-se que apresentam com 4,19% das fontes de desabamentos, seguidamente dos conglomerados com 2,49% e nos filões de quartzo com 0,44%.

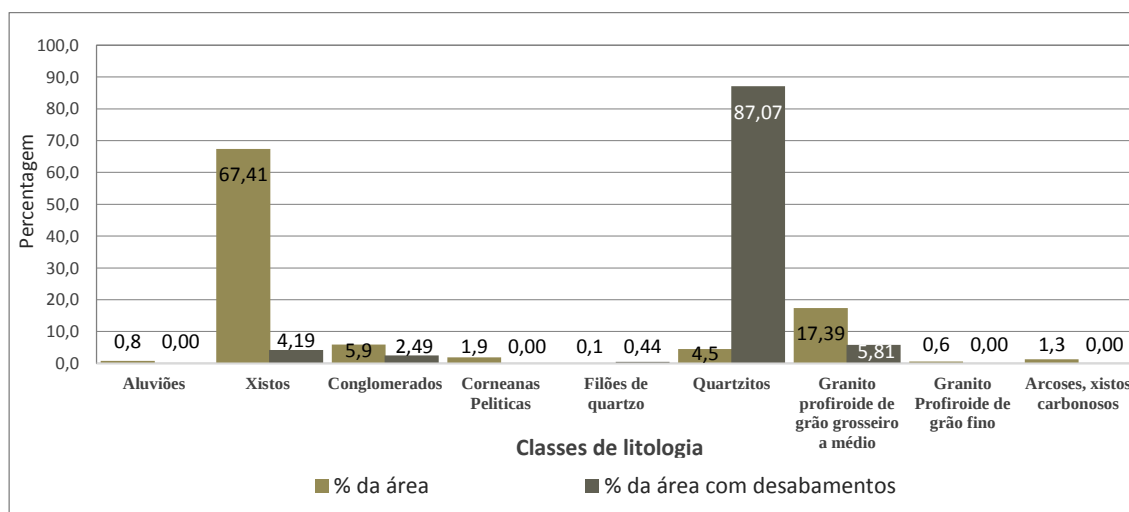


Gráfico 6 - Percentagem de área ocupada pelas classes de litologia e respetiva percentagem de área total com desabamentos

Desta análise explica-se quais as variáveis físicas do território que revelaram um maior grau para explicar os desabamentos. No cruzamento do inventário com fatores de predisposição são condições preferenciais à ocorrência de desabamentos, na litologia a presença dos quartzitos (UL6) e a filões de quartzo (U15), nos declives as classes 25°-30 (D4), 30°-35° (D5), 35°-40° (D6), 40°-45 (D7) e > 45° (D8), nas exposições as vertentes expostas a noroeste (EXP9) e a oeste (EXP8), na curvatura da vertente convexa (CURV3), no solo classificado de Florestas (UOS4), vegetação arbustiva e herbácea natural (UOS5) e Áreas de Extração de inertes (UOS2).

4.2 - Modelação da suscetibilidade a desabamentos

A modelação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos realizada no concelho de Castelo de Paiva, baseou-se em métodos indiretos de cartografia, designadamente na estatística bivariada, através do método do VI, que relaciona as fontes de desabamentos com cada fator de predisposição e avalia a importância relativa de cada classe na instabilidade da vertente.

A modelação foi executada neste método devido à simplicidade do processamento das equações de cálculo e os resultados obtidos revelaram grande robustez. A unidade cartográfica

matricial de representação utilizada foi com pixéis ou células de 5 metros bem como assegurou-se a conformidade da cartografia usada com a resolução adequada e o mesmo datum.

Os resultados dos valores de suscetibilidade para cada classe de cada fator de predisposição, obtidos pela aplicação dos métodos estatísticos do Valor Informativo, podem ser consultados na tabela 10.

Tabela 10 - Scores das variáveis utilizadas na construção do modelo de suscetibilidade pelos métodos do Valor Informativo (VI), com o grupo total de fontes de deslizamentos

Mapa temático	Unidades de análise	Classes	Valor Informativo GTF
Declives	D1	<15°	-1,805
	D2	15 - 20	-1,523
	D3	20 - 25	-0,156
	D4	25 - 30	0,983
	D5	30 - 35	1,499
	D6	35 - 40	2,017
	D7	40 - 45	2,198
	D8	> 45	2,425
Exposições das vertentes	Exp1	Plano	-1,653
	Exp2	Norte	0,037
	Exp3	Nordeste	-0,389
	Exp4	Este	-0,443
	Exp5	Sudeste	-0,364
	Exp6	Sul	-0,349
	Exp7	Sudoeste	-0,170
	Exp8	Oeste	0,568
	Exp9	Noroeste	0,637
Curvatura das vertentes	Curv1	Côncava < -0,15	-0,255
	Curv2	Plano -0,15 - 0,15	-0,824
	Curv3	Convexa > 0,15	0,323
Uso do solo	UOS1	Territórios artificializados	-1,866
	UOS2	Áreas de Extração de inertes	0,997
	UOS3	Áreas agrícolas e agro-florestais	-1,900
	UOS4	Florestas	-0,047
	UOS5	Vegetação arbustiva e herbácea natural	1,429
	UOS6	Zonas descobertas e com pouca vegetação	-1,900
	UOS7	Corpos de água	-1,900
Litologia	UL1	Aluviões	-2,800
	UL2	Xistos	-2,769
	UL3	Conglomerados	-0,860
	UL4	Corneanas Pelíticas	-2,800
	UL5	Filões de quartzo	1,265
	UL6	Quartzitos	2,967
	UL7	Granito profiroide de grão grosseiro a médio	-1,087
	UL8	Granito Profiroide de grão fino	-2,800
	UL9	Arcoses, xistos carbonosos	-2,800

As unidades de terreno com VI negativo apontam e mantendo as situações atuais terão menor predisposição para serem afetadas no futuro pelo fenómeno. Neste sentido quanto mais baixo for o valor do VI mais reduzida é a possibilidade de haver suscetibilidade, por outro lado os valores do Valor Informativo positivos indicam para a presença da suscetibilidade ao fenómeno e cada vez maior quanto for o aumento do valor do *score*.

O cálculo do VI foi efetuado para a totalidade das fontes de desabamentos. A análise foi realizada a cada uma das variáveis utilizadas na modelação de modo independente. Os *scores* do valor informativo que têm uma maior influência na distribuição das fontes de desabamentos foram assinalados a negrito.

Nas variáveis uso do solo e litologia houve classes que não houve registo de fontes de desabamentos, o Valor informativo não foi determinado devido à normalização logarítmica (impossibilidade de obter o logaritmo natural do valor 0, consequente da divisão da probabilidade condicionada pela probabilidade a priori). Para estes casos, considerou-se como valor informativo o decimal mais baixo por comparação ao VI mínimo obtido na respetiva variável. Nestes casos, considerou-se como *score* de VI o decimal mais baixo por comparação ao *score* de VI mínimo alcançado nos cálculos da modelação da respetiva variável independente e estão assinalados a itálico.

O valor informativo no grupo total de fontes apresentam resultados negativos nas classes D1 com declives inferiores a 15°, D2 com declives entre 15°-20° e D3 com declives entre 20°-25°, isto demonstra que com declives abaixo dos 25° não são propícios ao aparecimento ou geração de desabamentos nesta área de estudo. Nas classes de declives D4 a D8 os valores do valor Informativo aumentam progressivamente. Neste sentido a classe D8, com declives superiores 45° apresenta os valores de VI mais elevado. Destes resultados é importante referir a expressão territorial desigual entre as várias classes de declive.

Nas exposições a unidade de análise Exp1 corresponde à classe plano e ocupa 6,56% de área e com se esperava apresentam o VI negativo. Os valores de Valor Informativo positivos verificam-se nas vertentes orientadas a Noroeste (Exp9) e Oeste (Exp8). É de destacar que as vertentes viradas a Norte (Exp2) obtiveram um VI positivo, pelo contrário as vertentes viradas a Sul (Exp_6) ocorreu valor negativo.

Na curvatura das vertentes os *scores* positivos de VI encontram-se nas vertentes convexas, ao contrário, os *scores* mais negativos ocupam as áreas retilíneas ou planas. Nas vertentes côncavas possuem *scores* menos negativos do que as vertentes planas. A unidade de análise curv1 corresponde á classe côncava (curv1), ocupa 37,64% da área total do concelho e possui um *score* negativo de VI, no entanto contém 29,15% de fontes de desabamentos.

Quanto à distribuição relativa na área de estudo, os valores percentuais são diferentes, sendo as vertentes convexas as que se encontram com mais representação espacial com 46.1% da área de estudo.

No uso do solo os *scores* positivos de VI ocorrem em apenas duas unidades de análise, na classe UOS2 - Área de extração de inertes e na classe UOS5 - Vegetação arbustiva e herbácea natural. Nos resultados da tabela 10 existem de três classes sem fontes de desabamentos, áreas agrícolas e agroflorestais, zonas descobertas e com pouca vegetação e corpos de água, os valores de VI destas classes foram forçados porque $S_i=0$.

O gráfico 5 indica que as classes mais representativas de área relativa correspondem às classes das Florestas com 67,26 % e áreas agrícolas e agroflorestais com 17,38 % e a vegetação arbustiva e herbácea natural com 7,82%, no entanto a classe UOS5 - Vegetação arbustiva e herbácea natural, embora apresente uma área muito menor apresenta valores positivos de VI. É de destacar que apesar da classe das florestas possuírem uma percentagem de fontes de desabamentos elevada com 65,54%, obteve um score de VI negativo, devido à sua grande representação espacial que ocupa 67,26% de área total.

Na litologia existem quatro classes sem fontes de desabamentos, os aluviões, as corneanas pelíticas, o granito Profiroide de grão fino e as arcoses, xistos carbonosos, os valores de VI destas classes foram forçados ao decimal mais baixo por comparação ao score de VI mínimo desta variável porque $S_i=0$, foi utilizado os dados a negrito para destacar a diferença com os outros registos. Nas classes litológicas mais representadas no concelho, a UL2 - xistos com 67,41% da área total e a UL7 - granitos porfiroide de grão grosseiro a médio com 17,39%, mas não são as que apresentam maior propensão para a ocorrência de queda de blocos. Nestas classes registaram-se *scores* de VI negativos em todos os grupos de fontes, enquanto os valores de VI mais elevados registaram-se nas UL6 - quartzitos, representando uma área espacial de 4,5% da área total e na classe UL5 - Filões de quartzo que representa 0,13% de área total.

Após esta fase foi representado cartograficamente (Figura 34) os resultados do Valor informativo - suscetibilidade não classificada. No grupo total de fontes os *scores* do VI por pixel variam entre -8,981 e 7,712 e do cruzamento das 5 variáveis foram identificadas 3026 unidades de condições únicas (Tabela 11)

Tabela 11 - Scores do VI do GTF e unidade de condições únicas

Fontes de desabamentos Inventário	Scores	Unidades de condições únicas
GTF	-8,981 <> 7,712	3026

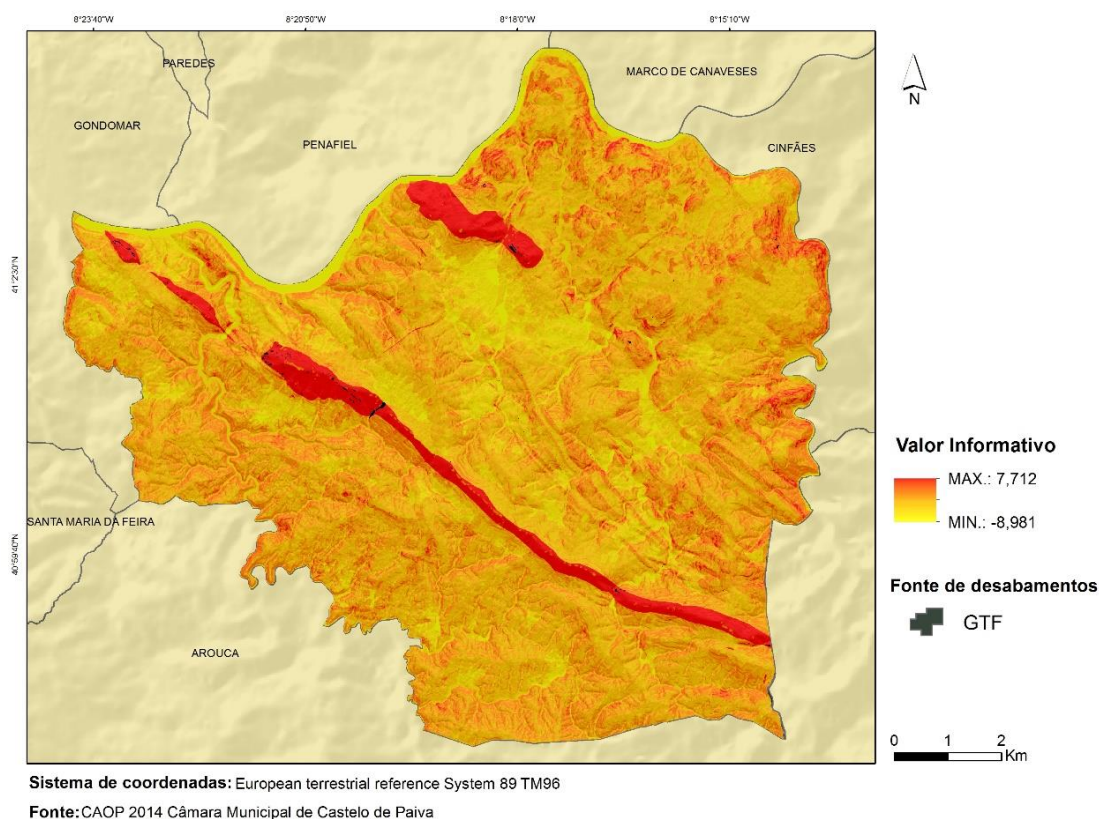


Figura 34 - Suscetibilidade não classificada a desabamentos, baseada no GTF, através do método do Valor Informativo

Posteriormente à modelação da suscetibilidade é fundamental efetuar a validação dos resultados dos modelos para apurar o seu grau de ajustamento à realidade e classificar os mapas de suscetibilidade.

4.3 - Validação da suscetibilidade a desabamentos

Os mapas de suscetibilidade devem ser validados para se avaliar a sua capacidade preditiva em relação a futuros movimentos de vertente (Zezere et al., 2004), sob pena de serem considerados inúteis e inconsistentes do ponto de vista científico.

A cartografia de suscetibilidade indicam a propensão futura para uma determinada área se instabilizar. Por isso é fundamental analisar muito bem os resultados e serem revistos antes de serem apresentados aos decisores.

É importante referir que a não validação dos mapas de suscetibilidade, não pode ser considerado parte anexa do ordenamento do território e também não pode integrar e auxiliar a gestão dos planos de emergência municipais e gestão de crises relacionados com a ocorrência de movimentos de vertentes (Van Den Eeckhaut et al., 2010).

Na produção dos mapas finais de suscetibilidade é importante que a etapa de validação dos resultados seja considerada essencial.

Um mapa de suscetibilidade é mais consistente quanto maior for a sua capacidade para prever a localização de futuras áreas de instabilidade.

Na avaliação da precisão dos modelos de suscetibilidade produzidos, existem e tem sido aplicados várias técnicas, destacando-se os, as curvas de sucesso e de predição e o calculo da área abaixo da curva.

A avaliação com a técnica das curvas de sucesso e de predição (Chung e Fabbri, 1999; 2003; 2005) é apresentada através de um gráfico, numa escala que varia entre 0 e 1, demonstrando no eixo das abcissas (X) a área de estudo classificada por ordem decrescente de suscetibilidade, enquanto no eixo das ordenadas (Y) demonstra a percentagem da área deslizada predita. A determinação das taxas de sucesso e de predição é um procedimento de validação cruzada utilizado para testar a robustez, exatidão e validade de modelos de preditivos (Chung & Fabbri, 2008). A taxa de sucesso calcula-se com o cruzamento do mapa de suscetibilidade com todas as fontes de desabamentos utilizados na modelação. Este procedimento permite, definir o grau de ajuste do modelo aos dados de entrada (Zêzere, 2010). Através da taxa de predição, a validação dos mapas de suscetibilidade são cruzados com um grupo de fontes de desabamentos independente que foram utilizados para produzir o modelo. A determinação da predição é na prática um procedimento interessante, prevê o desempenho futuro do modelo, ao invés da perceção dos dados de entrada que indicam os movimentos passados.

A partição do inventário de fontes de desabamentos em 2 grupos permite a validação dos resultados (Chung & Fabbri, 2003), baseado nas seguintes técnicas de partição de inventários de movimentos de vertente: partição temporal, partição espacial e partição aleatória. Um dos grupos criado é utilizado para produzir o modelo de predição (grupo de treino), enquanto o outro grupo é utilizado para validar (grupo de teste), neste sentido com este procedimento, é possível determinar a capacidade preditiva do modelo para prever a localização de futuros movimentos de vertente (Chung & Fabbri, 2003; Guzzetti et al., 2005).

A determinação da área abaixo de cada curva ROC, de sucesso ou de predição o a área Abaixo da Curva - AAC facilita a avaliação quantitativa da capacidade preditiva de qualquer modelo de suscetibilidade (Zêzere, 2010).

Na validação através do cálculo da área abaixo da curva e de acordo com a literatura científica, valores de AAC entre 0,75 - 0,80 indicam para um modelo aceitável, com valores

de AAC entre 0,80 e 0,90 apontam para um modelo de suscetibilidade muito bom. Com valores de AAC > 0,90 representam modelos excelentes (Guzzetti, 2005).

A AAC varia numa escala de valores entre 0 e 1. Neste sentido quanto mais próximo de 1 for o valor da AAC maior será a capacidade preditiva do modelo. A equação matemática do cálculo da AAC é a seguinte:

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[(L_{si} - L_i) * \frac{a_i + b_i}{2} \right]$$

$L_{si} - L_i$ é a amplitude de cada classe;

a_i é o valor da ordenada correspondente a L_i ;

b_i é o valor da ordenada correspondente a L_{si} .

Na avaliação da capacidade preditiva o procedimento mais eficiente é realizar a modelação com os desabamentos passados e validar com os desabamentos futuros. No entanto no concelho não foi possível reunir informação suficiente sobre as datas de ocorrência de desabamentos e neste sentido foi aplicada uma partição aleatória das fontes de desabamentos para a validação da cartografia de suscetibilidade (Chung & Fabbri, 2003).

Na primeira abordagem à validação, o modelo produzido com o grupo total de fontes inventariadas foi calculado apenas taxa de sucesso e a respetiva AAC, uma vez que este modelo é produzido com o número total de fontes (166), não existe um grupo de movimentos independente para efetuar a validação, não foi calculado a taxas de predição. Os resultados da taxa de sucesso apresentam valores de 96,89%, valor de elevada precisão (Van Den Eeckhaut et al., 2009), presentes na tabela 12.

Tabela 12 - Relação entre fontes de desabamentos identificadas (%) e área de estudo classificada como suscetível por ordem decrescente (%) para as taxas de sucesso do modelo GTF

Modelo GTF 166 Fontes de desabamentos	Área de estudo classificada como suscetível (%)							Área Abaixo da Curva (AAC)	Taxa sucesso
	1	5	10	20	30	40	50		
Fontes de desabamentos corretamente identificadas (%)	58,20	88,12	93,82	96,57	97,80	98,61	98,71	95,60	96,89%

A curva da taxa de sucesso alcançada pelo método do VI (Gráfico 7), exhibe resultados bastante satisfatórios, nos 10% da área de estudo estão classificados como mais suscetível e estão localizados 93,82% das fontes de desabamentos e aumenta para 96,57% aumentando para 20% da área classificada como mais suscetível.

Os valores indicam que o modelo é fiável, apresentando a curva de declive da taxa de sucesso maior no seu início e deste modo uma grande parte da área instabilizada ocorre na área prevista como muito instável. O valor da AAC da taxa do sucesso é muito elevado e demonstra que o modelo GTF é robusto.

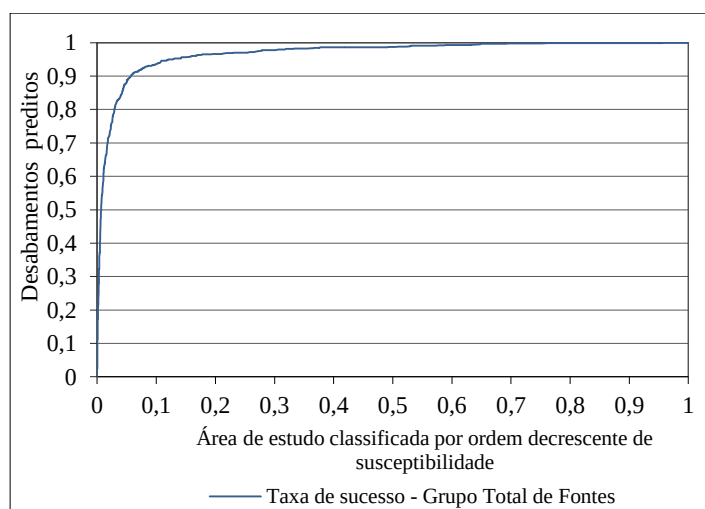


Gráfico 7 - Curvas de sucesso e modelo não classificados do grupo total de fontes de desabamentos

Na avaliação da capacidade preditiva, de modo a proceder-se a uma validação independente dos modelos preditivos, foi realizada uma partição aleatória do inventário de fontes de desabamentos (Chung & Fabbri, 2003), dividiu-se o total das fontes de desabamentos em duas amostras, presentes na figura 35.

As amostras foram selecionadas de forma aleatória na extensão do Geostatistical do ArcGis 10.2, em que cada grupo representa 50% das fontes totais de desabamentos (83 registos): o G1 (modelação) e o G2 (validação).

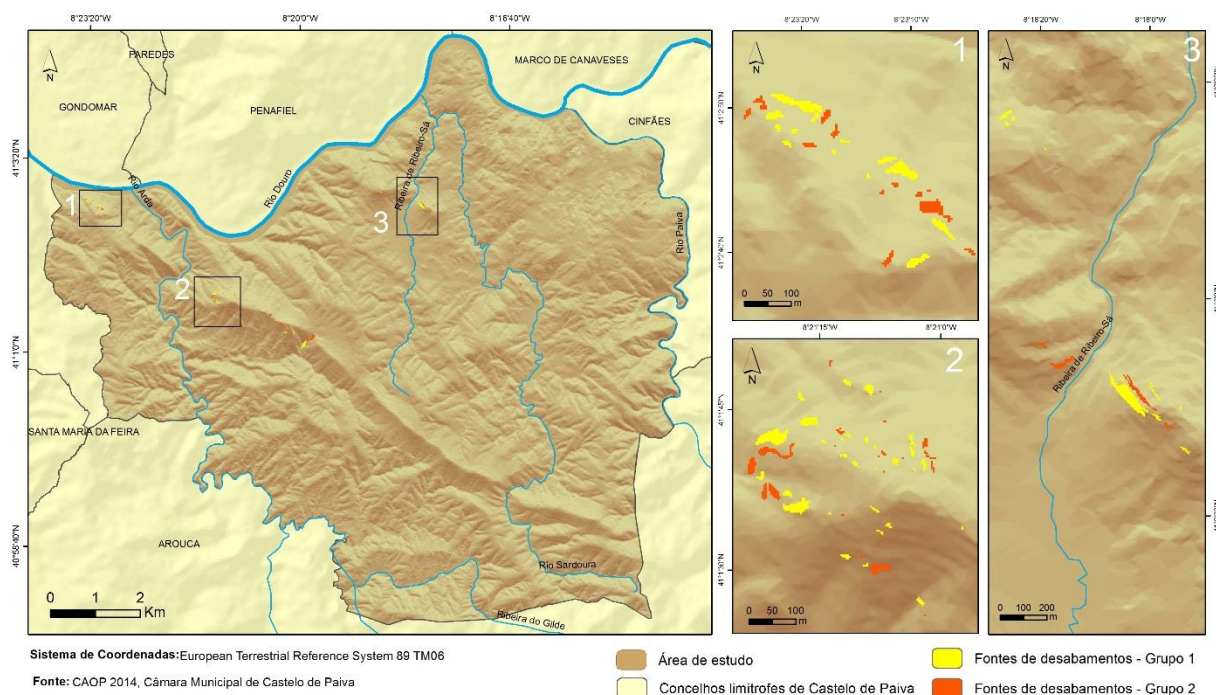


Figura 35 - Partição aleatória do inventário de fontes de desabamentos, grupo 1 e no grupo 2 e distribuição espacial na área de estudo

Os dois grupos foram utilizados, alternadamente, como grupo de modelação e grupo de validação. A grande vantagem da partição aleatória é que assume que os movimentos de vertentes passados ainda não ocorreram na área de estudo.

Foram efetuados 2 testes de modelação da suscetibilidade com o VI, baseada nas fontes de desabamentos do G1, validando a suscetibilidade modelada cruzando com as fontes de desabamentos do G2 e construídas as curvas de sucesso e de predição e calculada a AAC. O teste 2 é modelado com o G2 e validado os resultados com o G1.

Os grupos apresentam o mesmo número de fontes de desabamentos (Tabela 13), com 83 cada um, no entanto o grupo 1 regista 1844 píxeis de 25m², somando uma área total de 46 100 m², o grupo 2 regista 1993 píxeis de 25m², somando uma área total de 49 925 m².

Tabela 13 - Dados relativos aos inventários de fontes de desabamentos obtidos por partição aleatória (Grupo 1 e Grupo 2) a partir do inventário global

Modelo	Total de fontes de desabamentos	Numero de píxeis 5*5	Área (m ²)
Grupo 1	83	1844	46 100
Grupo 2	83	1993	49 825

No primeiro teste de validação independente dos modelos preditivos, a suscetibilidade a desabamentos foi modelado com o G1 e validada com o G2 (Tabela 14), calculando-se as respetivas taxas de sucesso e predição.

Tabela 14 - Scores do VI das variáveis utilizadas na construção do modelo de suscetibilidade pelo método do Valor Informativo com as fontes de desabamentos do G1

Mapa temático	Unidades de análise	Classes	Valor Informativo G1
Declives	D1	<15°	-2,624
	D2	15 - 20	-1,498
	D3	20 - 25	-0,215
	D4	25 - 30	1,007
	D5	30 - 35	1,525
	D6	35 - 40	2,123
	D7	40 - 45	2,256
	D8	> 45	2,604
Exposições das vertentes	Exp1	Plano	-2,849
	Exp2	Norte	0,313
	Exp3	Nordeste	-0,397
	Exp4	Este	-0,709
	Exp5	Sudeste	-0,802
	Exp6	Sul	-1,115
	Exp7	Sudoeste	-0,103
	Exp8	Oeste	0,661
	Exp9	Noroeste	0,674
Curvatura das vertentes	Curv1	Côncava < -0,15	-0,363
	Curv2	Plano -0,15 - 0,15	-0,645
	Curv3	Convexa > 0,15	0,348
Uso do solo	UOS1	Territórios artificializados	-1,933
	UOS2	Áreas de Extração de inertes	-2,000
	UOS3	Áreas agrícolas e agro-florestais	-2,000
	UOS4	Florestas	-0,024
	UOS5	Vegetação arbustiva e herbácea natural	1,393
	UOS6	Zonas descobertas e com pouca vegetação	-2,000
	UOS7	Corpos de água	-2,000
Litologia	UL1	Aluviões	-4,000
	UL2	Xistos	-2,551
	UL3	Conglomerados	-3,992
	UL4	Corneanas Peliticas	-4,000
	UL5	Filões de quartzo	2,051
	UL6	Quartzitos	2,958
	UL7	Granito profiroide de grão grosseiro a médio	-0,848
	UL8	Granito Profiroide de grão fino	-4,000
	UL9	Arcoses, xistos carbonosos	-4,000

Neste teste de validação independente, o desempenho foi avaliado com curvas de sucesso, que apresentam valores de AAC mais elevados do que as curvas de predição (Gráfico 8). O valor da taxa de sucesso do modelo apresenta uma AAC de 96,98%, enquanto a taxa de predição apresenta uma AAC de 94,96%, resultado bastante satisfatório.

A curva de predição foi obtida pelo método do Valor Informativo, indica que em 10% da área de estudo permite prever 90,26% de desabamento se aumentando este valor para 95,18%, elevando área classificada como mais suscetível para 30% (Tabela 15).

Tabela 15 - Relação entre fontes de desabamentos identificadas (%) e área de estudo classificada como suscetível por ordem decrescente (%) para as taxas de sucesso e predição do modelo do G1

Modelo GRUPO 1 83 Fontes de desabamentos	Área de estudo classificada como suscetível (%)							(% da área de estudo necessária para abranger 100% das fontes)	Área Abaixo da Curva (AAC)	
	1	5	10	20	30	40	50			
Fontes de desabamentos corretamente identificadas (%)	63,99	87,90	93,60	96,74	98,21	98,26	98,96	95,74	96,98%	Taxa sucesso
	52,23	86,20	90,26	93,27	95,18	96,23	97,08	96,41	94,96%	Taxa de Predição

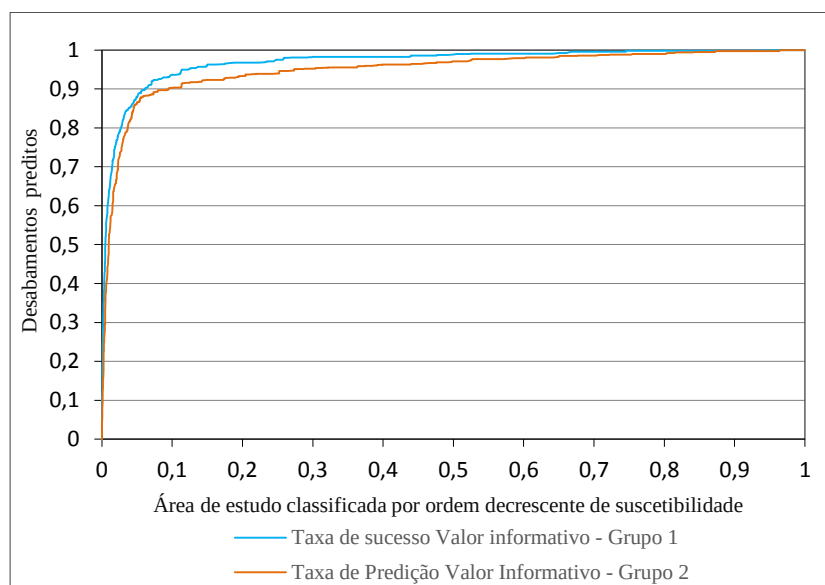


Gráfico 8 - Taxa de sucesso do G1 e taxa de predição do G2 do modelo de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos, através do método do Valor Informativo

Num segundo teste de validação independente dos modelos preditivos, a suscetibilidade a desabamentos foi modelado com o G2 e validada com o G1 (Tabela 16), calculando-se as respetivas taxas de sucesso e predição.

Tabela 16 - Scores do VI das variáveis utilizadas na construção do modelo de suscetibilidade pelos métodos do Valor Informativo com as fontes de desabamentos do G2

Mapa temático	Unidades de análise	Classes	Valor Informativo G1
Declives	D1	<15°	-1,286
	D2	15 - 20	-1,452
	D3	20 - 25	-0,019
	D4	25 - 30	0,890
	D5	30 - 35	1,466
	D6	35 - 40	1,853
	D7	40 - 45	2,034
	D8	> 45	2,071
Exposições das vertentes	Exp1	Plano	-0,884
	Exp2	Norte	-0,362
	Exp3	Nordeste	-0,304
	Exp4	Este	-0,254
	Exp5	Sudeste	-0,135
	Exp6	Sul	0,006
	Exp7	Sudoeste	-0,270
	Exp8	Oeste	0,443
	Exp9	Noroeste	0,647
Curvatura das vertentes	Curv1	Côncava < -0,15	-0,139
	Curv2	Plano -0,15 - 0,15	-0,951
	Curv3	Convexa > 0,15	0,279
Uso do solo	UOS1	Territórios artificializados	-1,877
	UOS2	Áreas de Extração de inertes	1,648
	UOS3	Áreas agrícolas e agro-florestais	-1,900
	UOS4	Florestas	-0,045
	UOS5	Vegetação arbustiva e herbácea natural	1,417
	UOS6	Zonas descobertas e com pouca vegetação	-1,900
	UOS7	Corpos de água	-1,900
Litologia	UL1	Aluviões	-3,300
	UL2	Xistos	-3,223
	UL3	Conglomerados	-0,209
	UL4	Corneanas Pelíticas	-3,300
	UL5	Filões de quartzo	-3,300
	UL6	Quartzitos	2,979
	UL7	Granito profiroide de grão grosseiro a médio	-1,350
	UL8	Granito Profiroide de grão fino	-3,300
	UL9	Arcoses, xistos carbonosos	-3,300

A exemplo do teste anterior, observam-se poucas diferenças de valores entre as curvas de sucesso e predição, com traçados semelhantes, visíveis no gráfico 9. As curvas de sucesso apresentam um valor de AAC de 96,76% e a curva de predição tem um valor de AAC de 96,36%. O teste 2 é o que apresenta melhores resultados, apresenta valores bastante elevados, de acordo com a tabela 17 para 10% da área de estudo permite prever 90,56% de desabamentos e se aumentarmos a área de estudo para 30% é possível prever para 97,39% dos desabamentos. Este modelo consegue validar a totalidade das fontes de desabamentos em 88,90% da área de estudo (Tabela 17). A curva de predição obtida com as fontes de desabamentos do grupo 1, são consistentes, permitindo a contribuição para um reforço da solidez da suscetibilidade da área em estudo.

O melhor modelo com melhor desempenho obtido correspondeu ao teste 2, modelação com o grupo 2 e validação com o grupo 1, modelo robusto com resultados bastante satisfatórios.

Tabela 17 - Relação entre fontes de desabamentos identificadas (%) e área de estudo classificada como suscetível por ordem decrescente (%) para as taxas de sucesso e predição do modelo do G2

Modelo GRUPO 2 83 Fontes de desabamentos	Área de estudo classificada como suscetível (%)							(% da área de estudo necessária para abranger 100% das fontes	Área Abaixo da Curva (AAC)	
	1	5	10	20	30	40	50			
Fontes de desabamentos corretamente identificadas (%)	51,22	89,36	94,73	96,83	98,04	98,49	98,64	86,79	96,76%	Taxa sucesso
	58,94	85,62	90,56	95,60	97,39	98,48	98,86	88,90	96,36%	Taxa de Predição

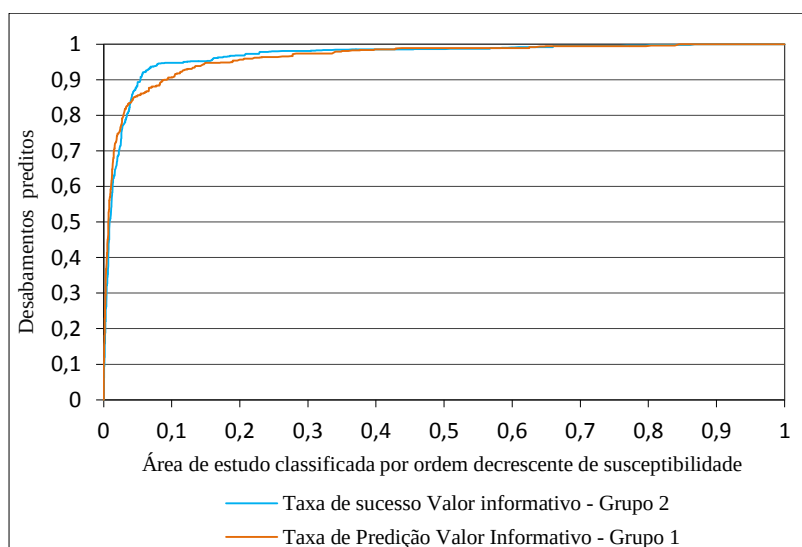


Gráfico 9 - Taxa de sucesso do G2 e taxa de predição do G1 do modelo de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos, através do método do Valor Informativo – Teste 2

No grupo 1 os *scores* do VI por pixel (Tabela 18) variam entre -10,969 e 7,890 e do cruzamento das 5 variáveis foram identificadas 2898 unidades de condições únicas. No grupo 2 os *scores* de VI por pixel variam entre -7,507 e 7,845 e do cruzamento das 5 variáveis foram identificadas 2863 unidades de condições únicas

Tabela 18 - Scores do VI de G1 e G2 e unidade de condições únicas

Fontes de desabamentos Inventário	Scores	Unidades de condições únicas
Grupo 1	-10,969 <> 7,890	2898
Grupo 2	-7,507<> 7,845	2863

4.4 - Cartografia de suscetibilidade à ocorrência de desabamentos

A classificação final dos modelos de suscetibilidade define a etapa final do procedimento da aplicação do método do VI, que corresponde à criação de cartografia com o zonamento da suscetibilidade para a área de estudo.

As diferentes etapas da modelação e validação da suscetibilidade deram origem a 3 modelos representativos da incidência espacial do perigo de desabamento na área de estudo. Os modelos de suscetibilidade selecionados permitiram efetuar uma classificação que traduz com facilidade a interpretação do zonamento da suscetibilidade na área de estudo.

No processo de divisão das classes, existe muita subjetividade, na qual poderá ter alguma influência na cartografia final. A aplicação de diferentes métodos, todos estatisticamente corretos para a divisão das classes poderá originar mapas muito diferentes (Garcia, 2002; Garcia et al, 2007).

Os referidos autores mencionam que um bom mapa de suscetibilidade não é o que apresenta suscetibilidade mais elevada em mais área, mas sim o mapa que apresenta uma melhor relação entre a menor percentagem de área classificada como mais suscetível e o maior número de movimentos preditos, deste modo contribui para uma boa capacidade preditiva do modelo (Garcia et al., 2007).

Um dos processos aplicados e mais adequados para classificar os mapas de suscetibilidade é partir das quebras ou ruturas naturais as curvas de sucesso e de predição (Garcia, 2002; Zêzere, 2010). A mais-valia da classificação através da curva de predição, permite uma interpretação preditiva, uma vez que esta validação decore com movimentos independentes (Zêzere, 2006).

A curva de predição é uma das formas que poderá ser utilizada para interpretar o mapa de suscetibilidade. Nas curvas das taxas de predição pode-se definir as classes de suscetibilidade, sendo que os limites correspondem às ruturas de declives presentes na curva (Fabbri et al., 2004); (Chung & Fabbri, 2005).

As curvas de predição são utilizadas para obtermos uma interpretação quantitativamente para classificar os mapas de suscetibilidade, devemos então considerar os melhores resultados preditivos para a interpretação. Neste sentido podemos estabelecer uma relação de comportamento no futuro do tipo de instabilidade investigada que será similar ao do grupo de validação (Zêzere, 2006).

Como referido por Zêzere (2006), se a classe de suscetibilidade mais elevada corresponder a 10 % do total da área de estudo e estiver relacionada a uma taxa de predição de 70 %, podemos concluir que, 70 % dos futuros movimentos ocorrerão na área classificada com a suscetibilidade mais elevada.

No processo de classificação na definição do número de classes, deve ser reduzido e adequado à interpretação pelos pares, entre 3 a 5 classes (Sterlacchini et al., 2011). No entanto já foram referidas várias classificações, como é o caso da proposta de classificação de suscetibilidade a movimentos de vertente à escala municipal presente no Guia Metodológico que define quatro classes de suscetibilidade, instituídas numa escala qualitativa com referência à realidade de todo o território nacional (Julião et al., 2009).

No âmbito da Resolução do Conselho de Ministros nº 81/2012, foram aprovadas orientações estratégicas de âmbito nacional e regional para a delimitação da REN - Reserva Ecológica Nacional, a nível municipal. O regime da REN articula-se com o regime dos planos municipais de ordenamento do território (PMOT). No ponto 5 estabelecem-se os procedimentos metodológicos para a delimitação das áreas de instabilidade de vertente. Devem integrar a REN as vertentes classificadas como mais suscetíveis pela aplicação do Método do Valor Informativo. A área a integrar na REN deve ser a suficiente para garantir a inclusão de uma fração nunca inferior a 70 % das áreas identificadas como instabilizadas no inventário. Assim, é expectável que cerca de 30 % dos movimentos de massa em vertentes não sejam englobados na REN pelo modelo preditivo baseado na aplicação do Valor Informativo. A superfície correspondente aos movimentos de massa em questão deve ser incluída diretamente na REN, acrescida de uma faixa de segurança de 10 m definida para o exterior dos limites de cada movimento.

Neste seguimento, Van Den Eeckhaut et al. (2009) indicam, como valores de referência para um modelo com graus de ajustamento muito elevado, taxa de sucesso ou de predição em que pelos 70% dos movimentos são validados em apenas 10% da área mais suscetível.

Na primeira etapa para a obtenção da cartografia de suscetibilidade, são produzidos os 3 modelos não classificados obtidos através da modelação a partir da validação. Na segunda etapa foi efetuado a classificação através das ruturas ou quebras naturais das curvas de sucesso e de predição dos 3 modelos (Chung & Fabbri, 2005). Nesta etapa da modelação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos, ao nível da representação cartográfica, foram elaborados 3 mapas de suscetibilidade classificados representativos da incidência espacial do perigo de desabamento na área de estudo. Estes mapas classificados consistem numa divisão em classes dos resultados finais, representando as unidades cartográficas com intervalos de valores, com o objetivo de alcançar um padrão de predição que pode ser visualizado e interpretado (Chung & Fabbri, 2003). Deste modo, o mapa de suscetibilidade final deve derivar do modelo onde se obteve o valor de AAC mais elevado, garantindo logicamente um maior potencial preditivo (Blahut et al., 2010).

Neste trabalho foi optado classificar os 3 modelos, o GTF, G1 e G2 (Tabela 19), foram classificados e delimitadas em 4 classes quantitativas de suscetibilidade.

Tabela 19 - Modelos seleccionados para a classificação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos

Modelo	Área abaixo da curva AAC	
	Taxa de sucesso	Taxa de Predição
GTF	96,89%	-----
Grupo 1	96,98%	94,96%
Grupo 2	96,76%	96,36%

Foi realizado o procedimento de classificação conforme os *scores* do valor informativo, nomeadamente através da inclinação ou da rutura da linha da curva de predição do modelo do G1, G2 e da linha da curva da taxa de sucesso do GTF. Além da classificação calculou-se a percentagem de área de estudo e a percentagem de fontes de desabamentos previstos validados em cada classe. Deste modo por cada classe definida foi atribuída uma denominação qualitativa da suscetibilidade.

Os critérios de classificação dos modelos produzidos foram representados num mapa e foi estabelecido para a escala qualitativa 4 classes (Tabela 20), classe I – suscetibilidade muito

elevada; classe II – suscetibilidade elevada; classe III – suscetibilidade moderada e classe IV – suscetibilidade nula ou reduzida.

Tabela 20 - Classificação qualitativa da suscetibilidade adotada

Classes de suscetibilidade	Classificação	Cor
I	Suscetibilidade muito elevada	Red
II	Suscetibilidade elevada	Orange
III	Suscetibilidade moderada	Yellow
IV	Suscetibilidade nula ou reduzida	Green

O principal objetivo do zonamento da suscetibilidade é compreender um maior número de movimentos de vertente na classe de suscetibilidade mais elevada, o modelo é sempre mais eficaz quanto menor for a área dessa classe (Fell et al., 2008).

O primeiro modelo a ser classificado foi o GTF, através da ruturas ou quebras naturais da curva de sucesso (Gráfico 10), identificaram-se 4 classes de suscetibilidade, calculou-se a percentagem da área de estudo e a percentagens de desabamentos validados.

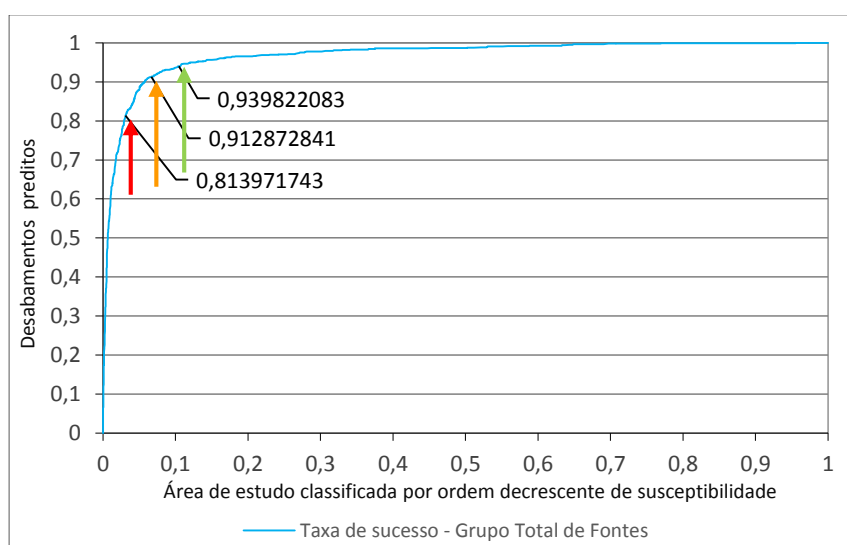


Gráfico 10 - Curvas da taxa de sucesso da avaliação da suscetibilidade com o método do Valor Informativo, modelada com o GTF e respetiva divisão de classes de suscetibilidade.

No modelo GTF, apenas foi possível determinar a taxa de sucesso, uma vez que não havia um grupo independente para efetuar a validação. A classe de suscetibilidade I - Muito elevada (Tabela 21) corresponde a 3,08% da área total, consegue validar 81.39% das fontes de desabamentos. A classe de suscetibilidade 2 - Elevada, corresponde a 3,60% da área total, conseguindo validar 9,92% dos desabamentos. As duas classes de suscetibilidade (I - Muito elevada e II - Elevada) ocupam apenas 6,68% da área de estudo, mas conseguem validar

91,31% do total de desabamentos, estabelecendo um bom resultado e reforçam a qualidade do modelo.

Pelo contrário, a classe de suscetibilidade Reduzida ou nula está representada em 89.40% da área total e valida apenas 5.99% das fontes de desabamentos. As duas classes mais baixas de suscetibilidade (III – Moderada e IV – Nula ou reduzida), conseguem prever 8,69% de desabamentos, ocupando 93,32% de área total.

Tabela 21 - Características das classes de suscetibilidade a desabamentos e percentagem de movimentos validados com base na curva de sucesso

Classes de suscetibilidade	Classificação	% da área de estudo	% Validados (Taxa de sucesso)
I	Muito elevada	3,08	81,39
II	Elevada	3,60	9,92
III	Moderada	3,92	2,70
IV	Nula ou reduzida	89,40	5,99

A figura 36 representa o primeiro mapa de suscetibilidade com a classificação em 4 classes de suscetibilidade, definidas através das ruturas ou quebras naturais da curva de sucesso, apresentando as seguintes características:

Classe I – representa as áreas com suscetibilidade muito elevada, que correspondem a 3,08% da área de estudo e inclui 81,39% da área afetada pelos desabamentos. Esta classe localiza-se nos alinhamentos orográficos com direção geral NW-SE, abrangendo as elevações do alto de São Domingos, elevações de Pedorido, Alto de S. Gens e Alto de S. Paul, onde se localizam afloramentos quartzíticos e as vertentes mais declivosas do concelho.

Classe II - representa as áreas com suscetibilidade elevada, correspondendo a 3,60% da área do concelho, compreende uma validação de 9,92% de desabamentos. Esta classe localiza-se também nas vertentes mais declivosas na área de estudo, superiores a 30° nas áreas onde afloram os granitos e nas duas faixas de elevações essencialmente compostas por quartzitos, alinhados na direção NW-SE, com topos, aplanados, exíguos e alongados.

Classe III – representa as áreas com suscetibilidade moderada, corresponde a 3,92% da área de estudo e inclui 2,70% da área com fontes de desabamentos. Esta classe observa-se nas vertentes pouco declivosas nas áreas com litologias graníticas.

Classe IV – representa a classe de mais baixa de suscetibilidade contempla 89,40% da área de estudo e valida ainda 5,99% de fontes de desabamentos. Esta classe nula ou reduzida localiza-se em áreas aplanadas com declives muito fracos, litologias de xistos do CXG, que ocupam 67,41% da área do concelho, o que determina o seu baixo potencial de instabilidade.

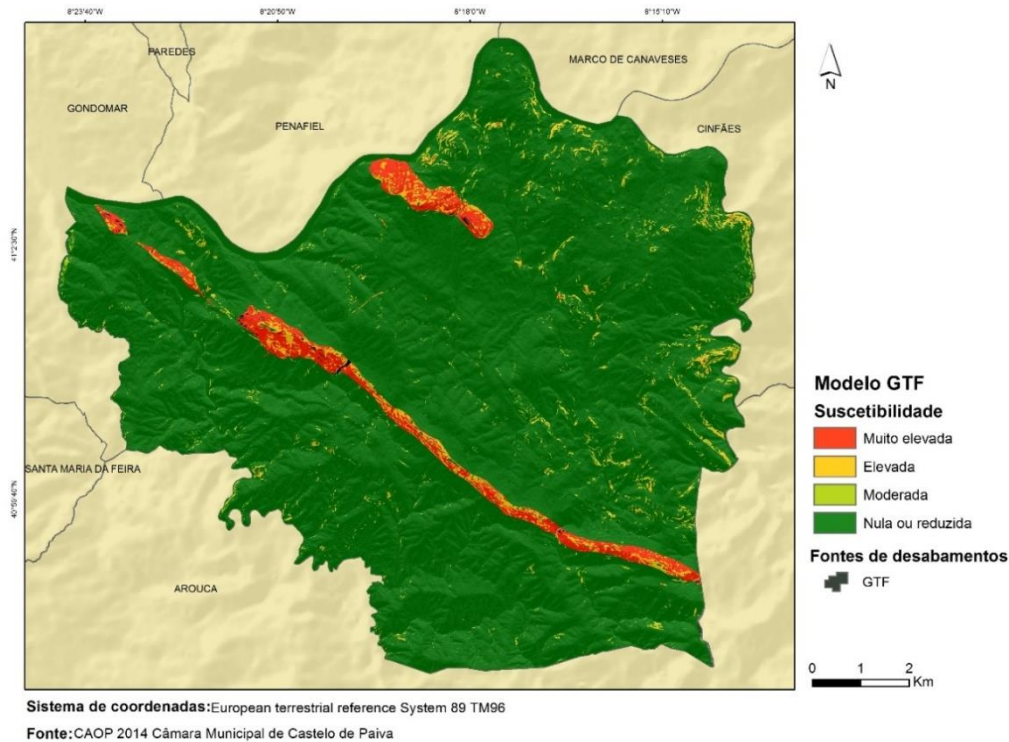


Figura 36 - Classes de suscetibilidade a desabamentos com base na curva sucesso do modelo GTF

A avaliação do desempenho do modelo G1 foi com recurso à percentagem de fontes de desabamento validadas com a taxa de sucesso e taxa de predição. O modelo foi produzido com o G1, foi validado com as fontes de desabamentos com o G2.

No modelo G1, determinou-se a taxa de sucesso e taxa de predição uma vez que havia um grupo independente para efetuar a validação. Nas ruturas da curva de predição identificaram-se 4 classes de suscetibilidade, foi calculada a percentagem da área de estudo e as percentagens de desabamentos previstos (Gráfico 11)

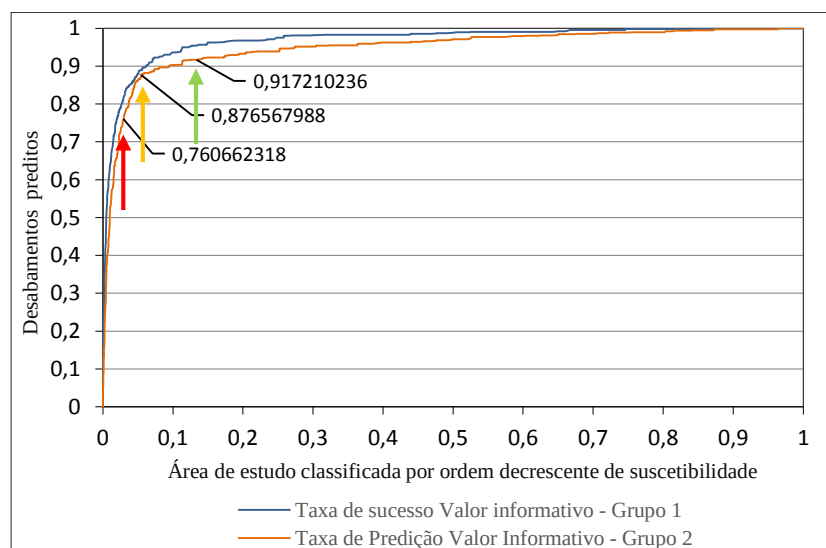


Gráfico 11 - Curvas da taxa de predição e de sucesso modelada com os desabamentos do G1 e validada com o G2 e respetiva divisão de classes de suscetibilidade

A classe de suscetibilidade I - Muito elevada, corresponde a 2,92% da área total, consegue validar 76,06% das fontes de desabamentos.

A classe de suscetibilidade 2 - Elevada, corresponde a 2,58% da área total, conseguindo validar 11,60% dos desabamentos. As duas classes de suscetibilidade (I - Muito elevada e II - Elevada) ocupam apenas 5,50% da área de estudo, mas conseguem prever 87,66% do total de desabamentos (Tabela 22), estabelecendo um bom resultado preditivo e reforçam a qualidade do modelo. Pelo contrário, a classe de suscetibilidade reduzida ou nula está representada em 86,32% da área total e valida apenas 8,27% das fontes de desabamentos. As duas classes mais baixas de suscetibilidade (III – Moderada e IV – Nula ou reduzida), conseguem prever apenas 12,34% de desabamentos, ocupando 94,50% de área total.

Tabela 22 - Características das classes de suscetibilidade a desabamentos e percentagem de movimentos validados com base na curva de sucesso e curva de predição

Classes de suscetibilidade	Classificação	% da área de estudo	% Validados (Taxa de sucesso)	% Validados (Taxa de predição)
I	Muito elevada	2,92	81,61	76,06
II	Elevada	2,58	7,33	11,60
III	Moderada	8,18	6,73	4,07
IV	Nula ou reduzida	86,32	4,33	8,27

Na elaboração de cartografia, elaborou-se o mapa de suscetibilidade a desabamentos não classificado com a modelação com o G1 e validado com o G2. A figura 37 representa o mapa de suscetibilidade a desabamentos não classificado, com do modelo G1, podendo observar-se a distribuição das fontes de desabamentos do G1 e do G2.

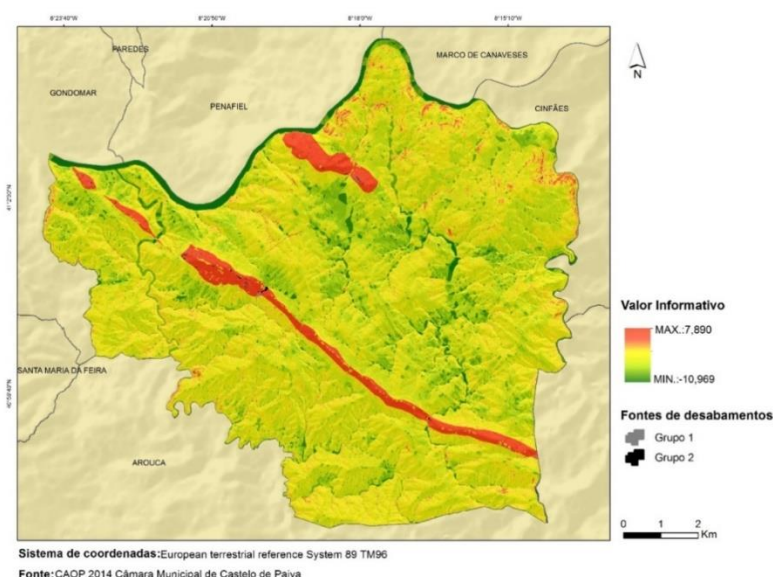


Figura 37 - Suscetibilidade não classificada a desabamentos modelada com o G1

A suscetibilidade a desabamentos foi classificada em 4 classes de suscetibilidade, (Figura 38) definidas a partir da curva da taxa de predição do G2, apresentando as seguintes características:

A classe I, corresponde a áreas com suscetibilidade mais elevada, os valores atingidos atestam o grau de ajuste do modelo, correspondem a 2,92 de área de estudo, apresenta uma taxa de sucesso de 81,61% e consegue validar através da taxa de predição 76,06% de fontes de desabamentos, ou seja, esta classe inclui 76,06 % de área de desabamentos não utilizados na modelação do G1. Esta classe localiza-se nos pontos mais altos do concelho, onde predomina os relevos com bancadas quartzíticas.

A classe II, representa as áreas com suscetibilidade elevada, correspondendo a 2,58% da área de estudo e inclui 11,60% da área com fontes de desabamentos não utilizados na modelação.

A classe III, corresponde a área com suscetibilidade moderada, abrange 8,18% da área de estudo e inclui 4,07% da área de desabamentos do grupo de validação.

A classe IV, representa as áreas com suscetibilidade mais baixa, correspondendo a 86,32% da área de estudo e contém ainda 8,27% da área das fontes de desabamentos do grupo de validação.

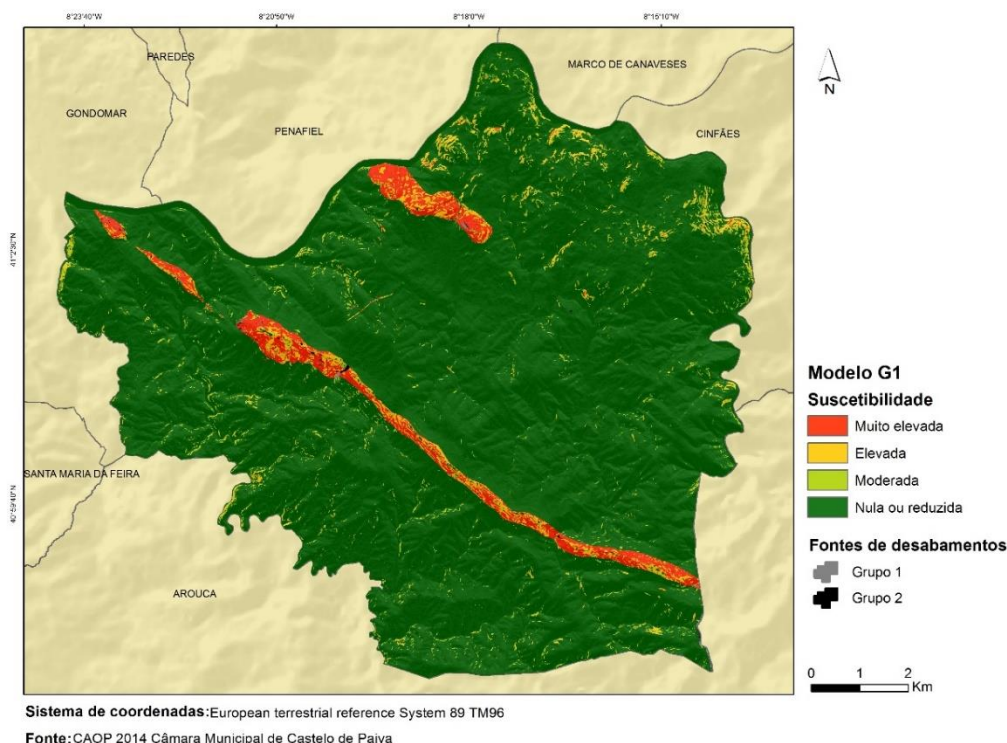


Figura 38 - Classes de suscetibilidade a desabamentos com base na curva de predição dos desabamentos do G2

Na modelação da suscetibilidade a desabamentos com o G2, o modelo foi validado com as fontes do G1 e neste sentido foi possível calcular as taxas de sucesso e predição. Através das quebras naturais da curva de predição (Gráfico 12), foram identificadas 4 classes de suscetibilidade, calculou-se a percentagem da área de estudo e a percentagens de desabamentos previstos.

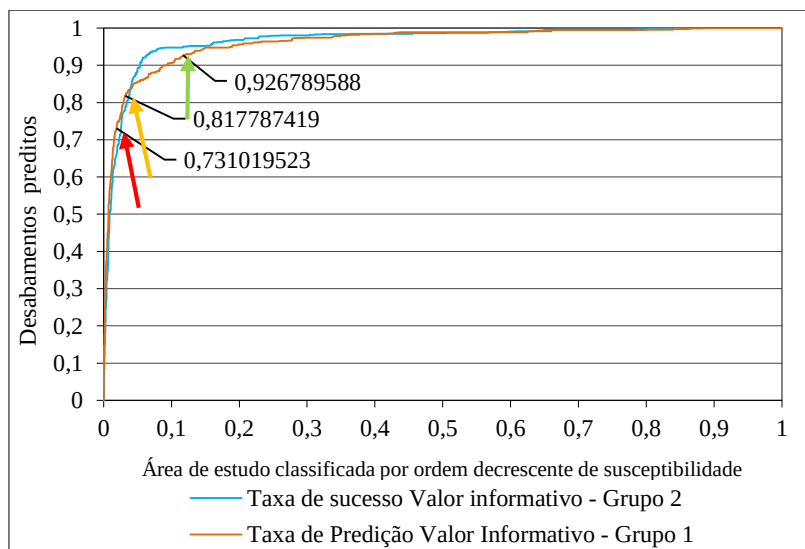


Gráfico 12 - Curvas da taxa de sucesso e predição, modelada com os desabamentos do G2 e validada com o G1 de desabamentos e respetiva divisão de classes de suscetibilidade

Os valores das 2 validações através da taxa de sucesso e predição não são diretamente comparáveis, o primeiro indica o grau de ajuste dos dados de entrada do modelo, o segundo da sua capacidade preditiva.

A classe de suscetibilidade I - Muito elevada, corresponde a 1,88% da área total, consegue validar 73,10% das fontes de desabamentos. Esta classe localiza-se nas vertentes mais declivosas do Alto de São Domingos, Alto de Pedorido, S.Gens, S.Paul. No topo destas vertentes estão presentes bancadas quartzíticas que definem o maciço rochoso, com a presença de grandes blocos fraturados.

A classe de suscetibilidade II - Elevada, corresponde a 1,36% da área total, conseguindo validar 8,67% dos desabamentos. As duas classes de suscetibilidade (I - Muito elevada e II - Elevada) ocupam apenas 3,24% da área de estudo, conseguem prever 81,77% do total de desabamentos, estabelecendo um bom resultado preditivo e reforçam a robustez do modelo.

Pelo contrário, a classe de suscetibilidade Reduzida ou nula está representada em 88,12% da área total e valida apenas 7,32% das fontes de desabamentos. As duas classes mais baixas de suscetibilidade (III – Moderada e IV – Nula ou reduzida), conseguem prever 18,23% de

desabamentos, ocupando 96,76% de área total. Estas classes localizam-se em áreas aplanadas com declives muito fracos, o que determina o seu baixo potencial de instabilidade.

Tabela 23 - Características das classes de suscetibilidade a desabamentos e percentagem de movimentos validados com base na curva de sucesso e curva de predição

Classes de suscetibilidade	Classificação	% da área de estudo	% Validados (Taxa de sucesso)	% Validados (Taxa de predição)
I	Muito elevada	1,88	65,98	73,10
II	Elevada	1,36	12,79	8,67
III	Moderada	8,64	16,22	10,91
IV	Nula ou reduzida	88,12	5,01	7,32

Na cartografia, elaborou-se o mapa de suscetibilidade a desabamentos não classificado com a modelação com o G2 e validado com o G1. A figura 39 representa o mapa de suscetibilidade a desabamentos não classificado, com base da modelação com o G2, podendo observar-se a distribuição das fontes de desabamentos do G1 e do G2.

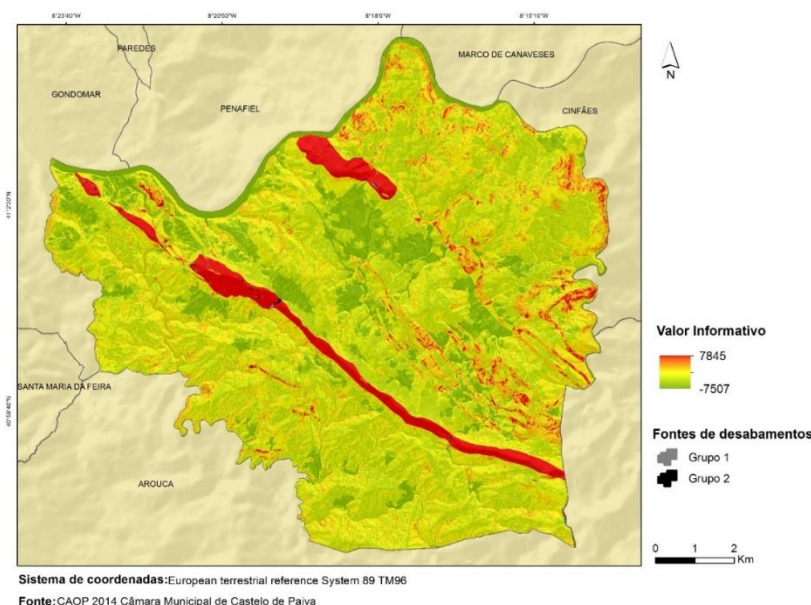


Figura 39 - Suscetibilidade não classificada a desabamentos modelada com o G2

A suscetibilidade a desabamentos foi classificada em 4 classes de suscetibilidade, definidas a partir da curva da taxa de predição do G1 (Figura 40) apresentando as seguintes características:

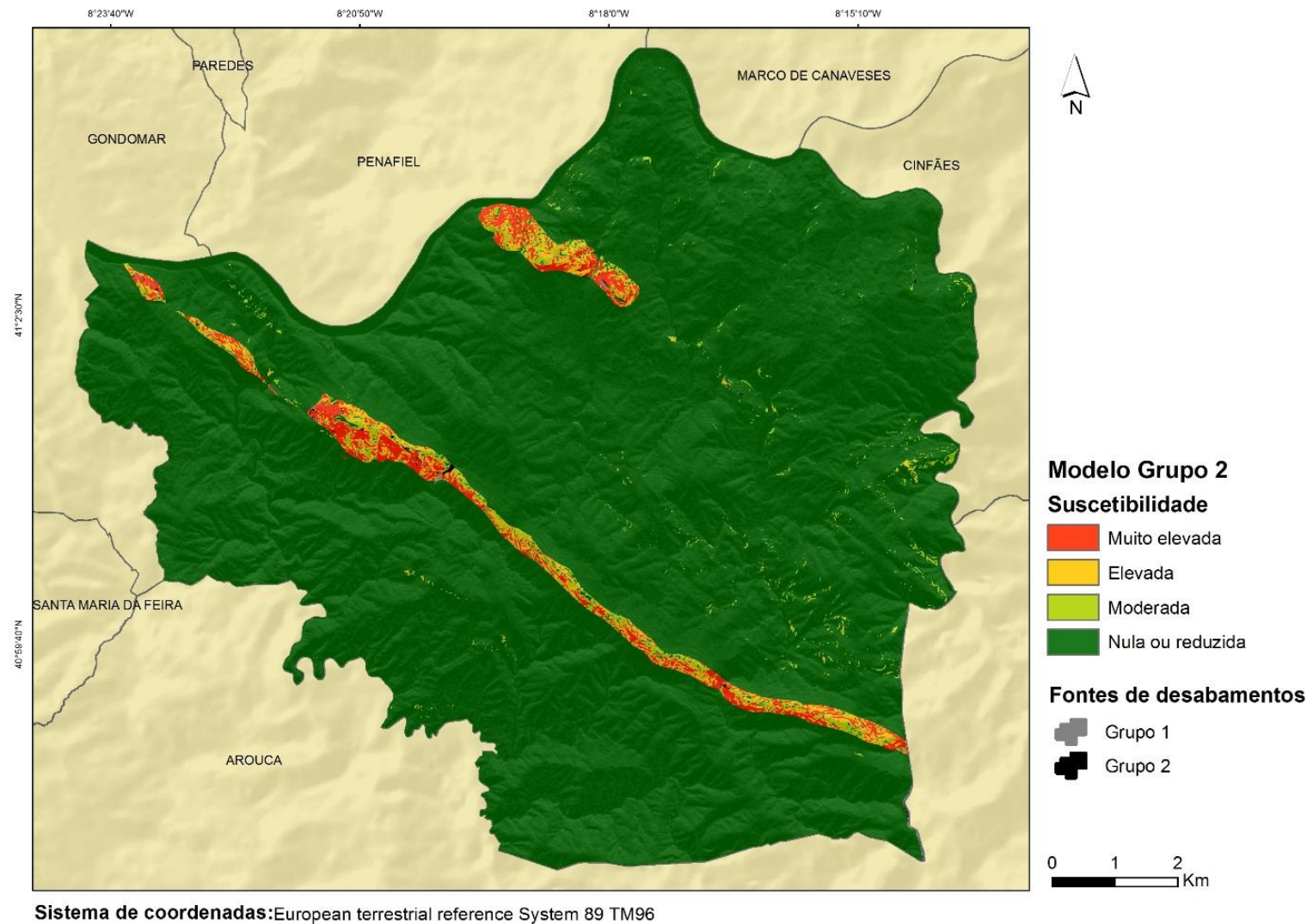


Figura 40 - Classes de suscetibilidade a desabamentos com base na curva de predição dos desabamentos do G1

4.5 - Análise sensitiva dos fatores de pré-disposição da suscetibilidade

Na modelação da suscetibilidade a desabamentos no concelho de Castelo de Paiva foram utilizados 5 fatores de pré-disposição, nomeadamente os declives, litologia, exposições das vertentes, curvatura das vertentes e uso do solo. As variáveis independentes utilizadas têm uma importância diferenciada na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos, deste modo foram realizados cálculos de hierarquização das variáveis. O cálculo da determinação da importância de cada uma das variáveis, foi considerado isoladamente cada um dos fatores de predisposição, calculando o valor informativo e a taxa de sucesso. Este processo responde às seguintes questões:

Quais os fatores de predisposição terão mais importância na localização das fontes de desabamentos?

Poderá construir-se modelos com menos variáveis com boa capacidade preditiva?

Na literatura científica, em investigações realizadas, o aumento do número de variáveis, aliado ao aumento do número de unidades de condições únicas, não tem obrigatoriamente de ter um aumento da capacidade preditiva de um modelo, na avaliação da suscetibilidade (Remondo et al., 2003; Sterlacchini et al., 2011). Neste sentido, a utilização de muitas variáveis poderá tornar os modelos com fraco desempenho preditivos (Sterlacchini et al., 2011).

A contribuição que cada fator de predisposição adquire na modelação não é linear e neste sentido é importante determinar de que forma a capacidade preditiva de cada modelo reage ao acréscimo ou a diminuição de variáveis.

A resposta a estas questões, foi realizado uma análise sensitiva e calculou-se a curva das taxas de sucesso e a AAC das diferentes variáveis independentes utilizadas para produzir o melhor modelo, o G2.

Nos cálculos da taxa de sucesso e das AAC, foi considerado isoladamente cada fator de predisposição da modelação e foi calculado o valor informativo. Posteriormente com o cruzamento do número de fontes de desabamentos de cada grupo com a área de estudo classificada por ordem decrescente de suscetibilidade, calculou-se a taxa de sucesso (Gráfico 13).

Para além destas tarefas, foi realizado a modelação com as fontes de desabamento do G2 e foi validado com as fontes do G1, com a utilização da combinação de variáveis mais importantes que se obteve com os resultados de AAC na taxa de predição.

Neste sentido foi realizado as seguintes etapas:

1º - Cada fator de predisposição é cruzado com o grupo de fontes de desabamentos no qual se pretende calcular a suscetibilidade;

2º - É produzido uma análise sensitiva com cada fator de predisposição, suportado no peso do movimento por classe do fator em análise.

3º - A hierarquia de cada fator de predisposição é calculada pela elaboração da curva de sucesso e cálculo da área abaixo da curva.

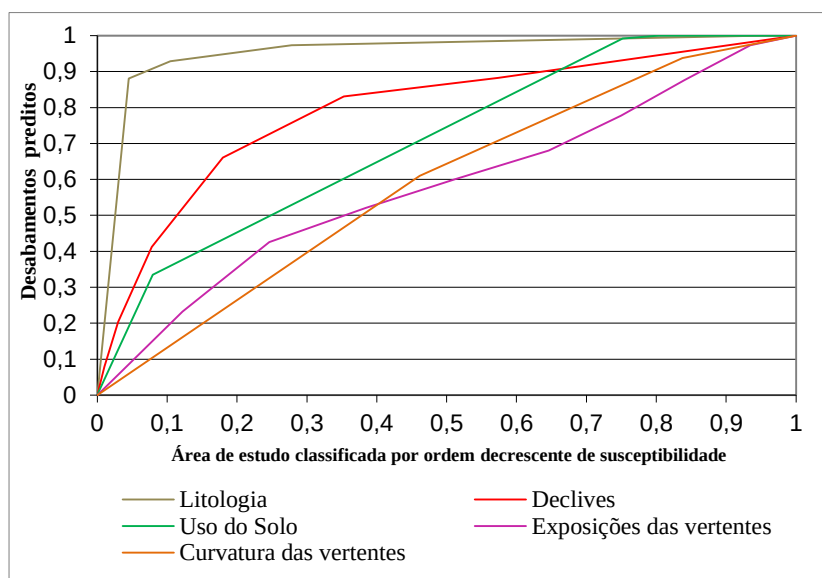


Gráfico 13 - Curvas de sucesso para cada fator de predisposição aos desabamentos no G2

Nos resultados alcançados verifica-se que as diferentes variáveis independentes apresentam taxas de sucesso distintas, com base nos resultados da tabela 24. Na hierarquização das variáveis, a mais relevante é a litologia que mais contribui e tem uma importância primordial para a explicação dos desabamentos na área de estudo, apresenta a melhor taxa de sucesso com uma AAC de 0,951, seguido dos declives com 0,781 de AAC, o que comprova a forte relação existente entre o declive e a localização dos abruptos rochosos. No entanto os declives deveriam possuir um valor de AAC mais elevado, as razões apontadas para este resultado estão também relacionadas com a resolução do MDT. As curvas de nível utilizadas para a construção do MDT têm intervalos de 10 metros e, por isso, não refletem em pormenor a variação altimétrica do terreno.

As variáveis exposições e curvatura das vertentes assumem hierarquias muito similares com valores de AAC de 0,588 e de 0,58 respetivamente. A variável uso do solo apresenta a pior taxa de sucesso com uma AAC de 0,51, o que comprova uma fraca relação entre o uso do solo, principalmente, com as áreas agrícolas e agroflorestais e territórios artificializados com a localização dos abruptos rochosos.

Tabela 24 - Hierarquia dos fatores de predisposição da instabilidade

Hierarquia	Variáveis	AAC Taxa de sucesso
1	Litologia	0,951
2	Declives	0,781
3	Curvatura das vertentes	0,588
4	Exposições das vertentes	0,580
5	Uso do solo	0,510

A hierarquia dos factores de instabilidade, com base com a tabela 24, foi respeitada na análise sensitiva, foi acrescentado uma nova variável na produção dos modelos de forma ordenada.

Para todas as combinações de variáveis no modelo foi calculada a AAC das taxas de sucesso e da taxa de predição. A tabela 25 sintetiza os resultados obtidos para cada combinação de variáveis modelada, representadas no gráfico 14.

Tabela 25 - AAC das taxas de sucesso do modelo de suscetibilidade do grupo 2, obtidas por análise sensitiva com a combinação de diferentes variáveis condicionantes da instabilidade, segundo o método do Valor Informativo

Numero de variáveis	Variáveis utilizadas	AAC Taxa de sucesso	AAC Taxa de Predição
2	Litologia + declives	0,964	0,961
3	Litologia + declives + Curvatura das vertentes	0,963	0,960
4	Litologia + declives + Curvatura das vertentes + Exposições	0,965	0,962
5	Litologia + declives + Curvatura das vertentes + Exposições + Uso do solo	0,967	0,963

Na análise sensitiva foram efetuadas varias modelações com um diferente número de variáveis, obtendo-se bons resultados com apenas 2 factores (litologia e declives) que apresentam uma AAC da taxa de sucesso de 0,964 e uma taxas de predição de 0,961.

O acréscimo de variáveis ao modelo de suscetibilidade não significa um aumento na taxa de sucesso. Deste fato resulta na utilização de 3 variáveis (Litologia + Declives + Curvatura das vertentes) terem obtido um resultado de AAC na taxa de sucesso de 0,963 e uma taxa de predição de 0,96 e o modelo com 2 variáveis (Litologia + Declives) alcançaram um resultado superior com uma AAC de 0,964 e uma taxa de predição de 0,961. Neste sentido os

desabamentos podem ser preditos sem ser necessário utilizar todos os fatores, sustentando sempre os resultados satisfatórios e a robustez do modelo.

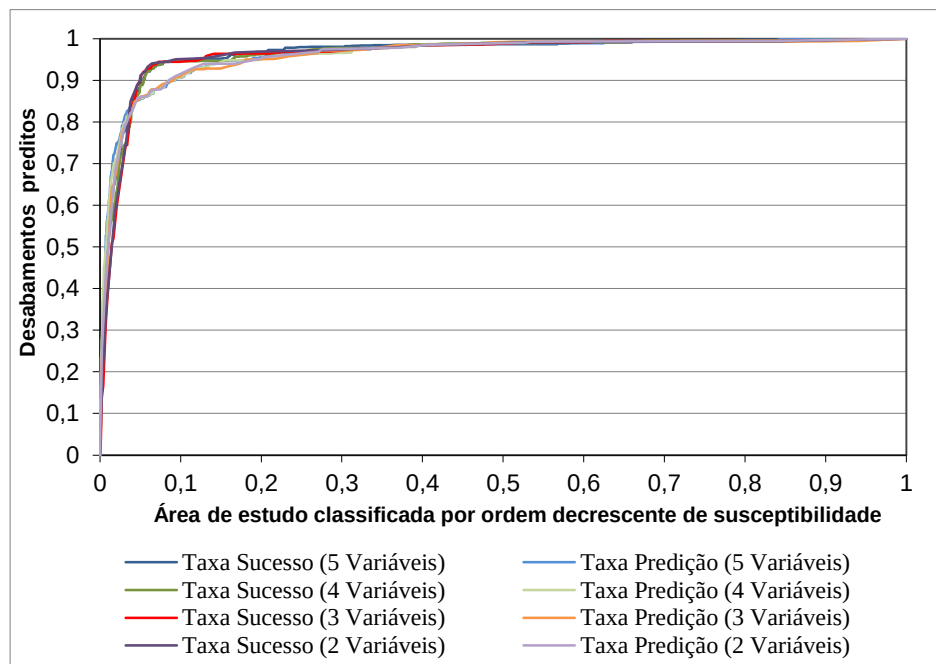


Gráfico 14 - Curvas de sucesso e predição dos modelos de avaliação da suscetibilidade a desabamentos obtidas com a combinação de 2 a 5 variáveis independentes.

Com base na análise sensítiva, a melhor taxa de sucesso com uma AAC de 0,967 e uma taxa de predição com uma AAC de 0,963 é conseguida com a combinação de 5 variáveis (Litologia + Declives + Curvatura das vertentes + Exposições das vertentes + Uso do solo).

Analisando os resultados pode-se concluir que a utilização das 4 combinações de variáveis a taxa de sucesso e predição são muito próximas às obtidas com totalidade das variáveis, que se demonstra nas reduzidas diferenças das percentagens de AAC entre os modelos.

Na análise sensítiva os valores do VI por pixel, presentes na tabela 26, variam entre - 7,507 e 7,845 do cruzamento das 2 variáveis mais importantes e foram identificadas 40 unidades de condições únicas.

Com o cruzamento das 3 variáveis mais importantes os scores variam entre -4,889 e 5,999 com 120 unidades de condições únicas. Na combinação das 4 variáveis mais importantes os scores variam de -5,608 e 6,645 e possui 924 unidades de condições únicas e por ultimo e já referenciados, a combinação com a totalidade das variáveis possuem 2863 unidades de condições únicas, com scores entre -7,507 e 7,845.

Tabela 26 - Valores de VI por pixel das variáveis na análise sensitiva e unidade de condições únicas

Fontes de desabamentos Inventário	Valores VI por pixel	Unidades de condições únicas
Litologia + declives	-7,507 < > 7,845	40
Litologia + declives+ Curvatura das vertentes	-4,889 < > 5,999	120
Litologia + declives+ Curvatura das vertentes + Exposições	-5,607 < > 6,645	924
Litologia + declives+ Curvatura das vertentes + Exposições + Uso do solo	-7,507 < > 7,845	2863

A figura 41 representa 2 modelos de suscetibilidade a desabamentos, modelo G2_LDC obtido com 3 variáveis (litologia + declives + curvatura das vertentes) e o modelo G2_LDCE obtido com 4 variáveis (litologia + declives + curvatura das vertentes + exposições).

O primeiro modelo é constituído por 120 unidades de condições únicas e tem uma AAC da taxa de sucesso de 0,963 e de taxa de predição de 0,960, enquanto o segundo modelo é constituído por 924 unidades de condições únicas e tem uma AAC de taxa de sucesso de 0,965 e de taxa de predição com 0,962.

A classificação foi no mesmo critério, com a área classificada por ordem decrescente de suscetibilidade, presente em percentagem da superfície total da área de estudo.

Entre os modelos existem poucas diferenças relacionadas com a uniformidade da suscetibilidade representadas no mapa. O mapa de suscetibilidade executado com os 4 variáveis apresenta uma maior variabilidade espacial que está relacionado ao número elevado de unidades de condições únicas, deste modo resulta uma maior dispersão na distribuição das classes de suscetibilidade. No mapa produzido com 3 variáveis apresenta uma maior uniformidade espacial, pelo número de unidades de condições únicas mais reduzido.

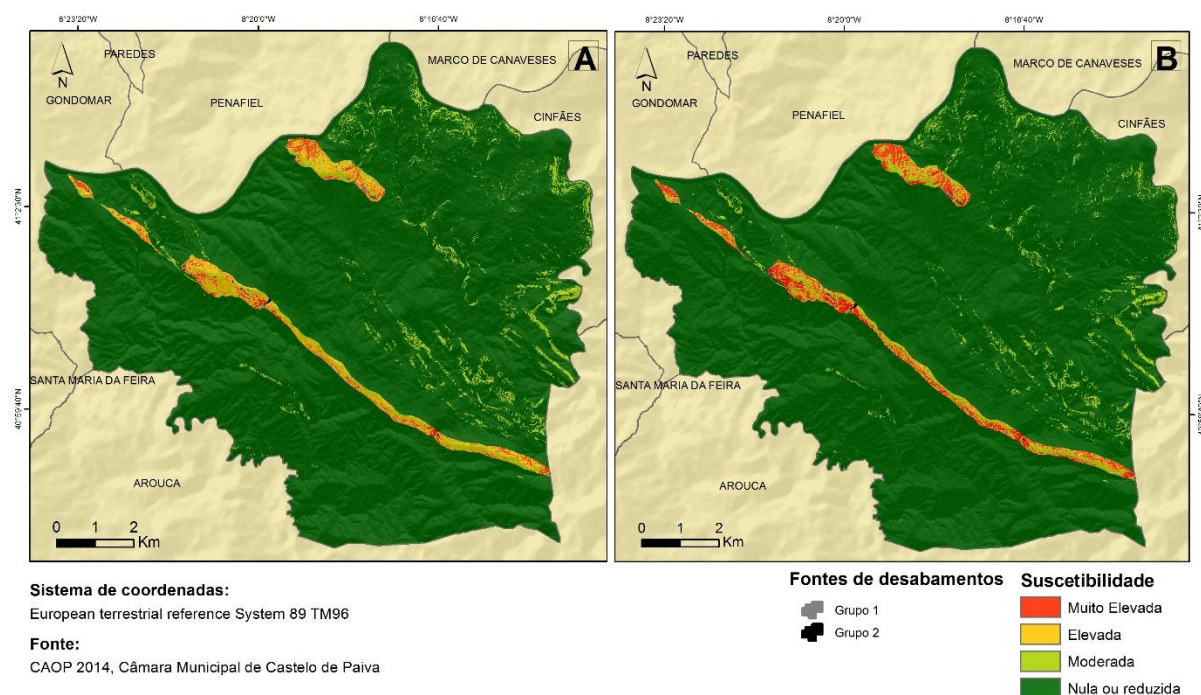


Figura 41 - Suscetibilidade a desabamentos, A) modelado o G2_LDC e validado com o G1_LDC; B) modelado com o G2_LDCE e validado com o G1_LDCE

Na avaliação com sobreposição dos desabamentos usados nas modelações com os mapas de suscetibilidade, confirmou-se que o modelo realizado com 4 variáveis apresenta melhor capacidade preditiva de desabamentos na classe de suscetibilidade I, como se pode verificar na tabela 27. No entanto o mapa com 3 variáveis consegue prever 79,55% de desabamentos nas 2 classes mais elevadas.

Tabela 27 - Características das classes de área decrescente de suscetibilidade a desabamentos dos modelos com 3 e 4 factores de predisposição definidas com base na curva de predição

Classes de suscetibilidade	Classificação	% da área de estudo		% de desabamentos preditos	
		Mapa com 3 variáveis	Mapa com 4 variáveis	Mapa com 3 variáveis	Mapa com 4 variáveis
I	Muito elevada	1,45	1,91	64,26	70,28
II	Elevada	1,93	1,37	15,29	10,14
III	Moderada	9,63	11,92	13,12	13,99
IV	Nula ou reduzida	86,99	84,80	7,33	5,59

A figura 42 representa os 2 modelos de suscetibilidade a desabamentos, modelo G2_LD obtido com 2 variáveis, (litologia + declive,) e o modelo G2 obtido com a totalidade das variáveis (litologia + declives + curvatura das vertentes + exposições + uso do solo).

O modelo G2_LD é constituído por 40 unidades de condições únicas e tem uma AAC da taxa de sucesso de 0,964 e uma AAC de taxa de predição de 0,961. Foi comparado com os resultados da modelação efetuada com o G2. A classificação foi no mesmo critério, com a área classificada por ordem decrescente de suscetibilidade, presente em percentagem da superfície total da área de estudo.

Entre os modelos existem algumas diferenças relacionadas com a uniformidade da suscetibilidade representadas no mapa.

O mapa de suscetibilidade executado com os 5 variáveis apresenta uma maior variabilidade espacial que está relacionado ao número elevado de unidades de condições únicas, deste modo resulta uma maior dispersão na distribuição das classes de suscetibilidade. No mapa produzido com 2 variáveis ostenta uma maior uniformidade espacial, pelo número de unidades de condições únicas muito mais reduzido.

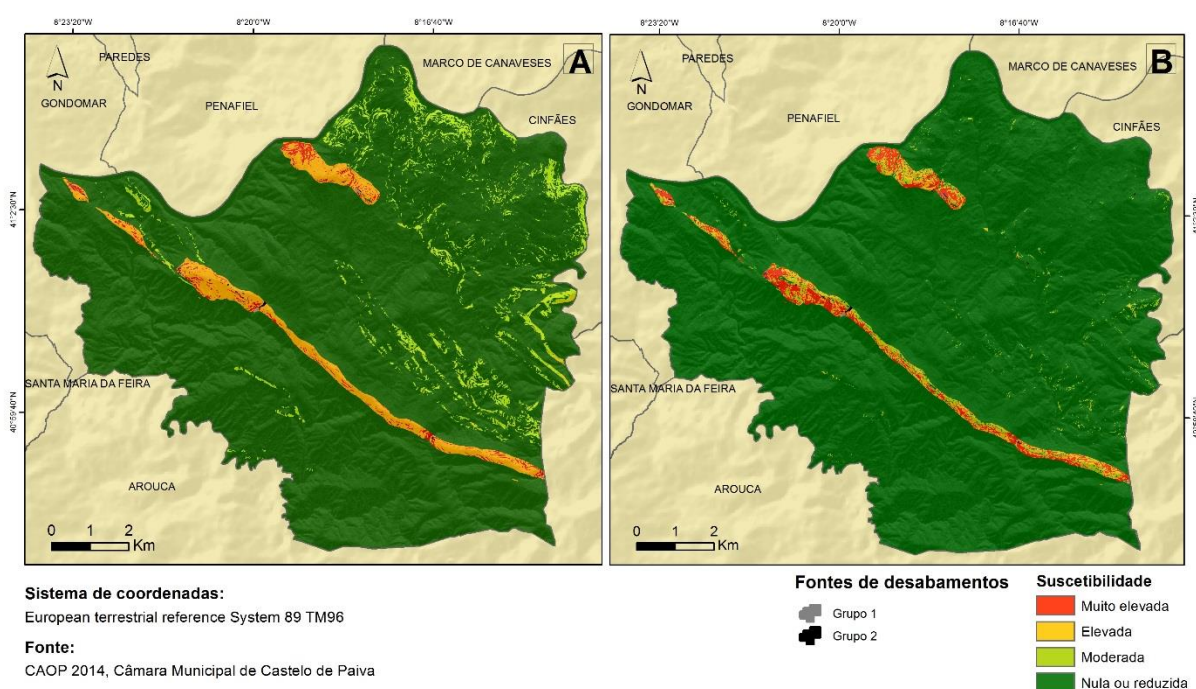


Figura 41 - Suscetibilidade a desabamentos, A) modelado o G2_LD e validado com o G1_LD; B) modelado com o G2 e validado com o G1

Na avaliação com sobreposição dos desabamentos usados nas modelações com os mapas de suscetibilidade, confirmou-se que o modelo realizado com 5 variáveis apresenta melhor capacidade preditiva de desabamentos na classe de suscetibilidade I, como se pode verificar na tabela 28.

Tabela 28 - Características das classes de área decrescente de suscetibilidade a desabamentos dos modelos com 2 e 5 factores de predisposição definidas com base na curva de predição

Classes de suscetibilidade	Classificação	% da área de estudo		% de desabamentos preditos	
		Mapa com 2 variáveis	Mapa com 5 variáveis	Mapa com 2 variáveis	Mapa com 5 variáveis
I	Muito elevada	1,86	1,88	68,32	73,10
II	Elevada	3,07	1,36	17,42	8,67
III	Moderada	11,76	8,64	8,24	10,91
IV	Nula ou reduzida	83,31	88,12	6,02	7,32

4.6 - Discussão dos resultados

No concelho de Castelo de Paiva foi realizada uma avaliação de suscetibilidade à escala 1: 00 000, em unidades matriciais de pixéis de 5m. O inventário é um dos grandes pontos positivos deste trabalho, com características importantes das fontes de desabamentos que foram inseridas na bases de dados geográfica realizada num SIG.

O método de estatística bivariada VI, utilizada para a modelação da suscetibilidade a desabamentos possibilitou realizar a validação estatística da modelação, condição essencial para a classificação dos modelos e obter cartografia de suscetibilidade.

Na área de estudo os resultados apresentam uma enorme influência dos fatores de predisposição de ordem natural, a litologia e declives.

A robustez e o desempenho dos modelos de suscetibilidade a desabamentos foram avaliados através da taxa de sucesso e taxas de predição.

O melhor resultado de desempenho dos modelos foi obtido pelo modelo G2, modelado com base nas fontes de desabamento do G2 e validado com as fontes de desabamentos do G1, obteve uma AAC de 96,76% de taxa de sucesso e uma AAC de 96.36% de taxa de predição.

Na avaliação da suscetibilidade aos desabamentos assume-se que a distribuição espacial dos desabamentos futuros pode ser prevista através de relações estatísticas entre os desabamentos passados com factores de predisposição da instabilidade geomorfológica.

Os resultados obtidos no modelo G2 permitem concluir que 81,77% dos futuros desabamentos no território de Castelo de Paiva deverão ocorrer na área classificada como a mais suscetível aos desabamentos e que corresponde a 3,24% da área total ou seja às classes I e II da suscetibilidade aos desabamentos.

A validação da cartografia de suscetibilidade foi essencial para avaliar a capacidade preditiva dos modelos em relação a futuros desabamentos. A robustez do modelo está dependente da informação de base e da dimensão da área de estudo.

A análise sensitiva permitiu definir quais as variáveis mais importante na explicação da instabilidade, podendo elaborar modelos com boa capacidade preditiva com menos variáveis para a área de estudo com características litológicas e geomorfológicas idênticas. Desta análise comprova a importância da litologia e dos declives para o zonamento da suscetibilidade a desabamentos. Individualmente a litologia apresenta uma taxa de sucesso de 0,951 e os declives de 0,781, o que comprova a forte relação destes dois fatores na explicação dos desabamentos e da localização dos abruptos rochosos nesta área de estudo

O mapa de suscetibilidade realizado com todas as variáveis apresenta maior variabilidade espacial, muito pormenorizado no zonamento. No entanto, conclui-se desta análise que o aumento das variáveis não significa um aumento das taxas de sucesso, como foi o caso da modelação com 2 variáveis (Litologia + declives) que alcançaram melhor taxa de sucesso (AAC - 0,964) e taxa de predição (AAC - 0,961), enquanto modelação com 3 variáveis (Litologia + Declives + Curvatura das vertentes) obteve uma taxa de sucesso (AAC -0,963) e uma taxa de predição (AAC - 0,960).

Capítulo 5 - Conclusões

Este trabalho procurou dar um contributo para um maior conhecimento da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos, suportado pelo SIG.

O objetivo principal visa desenvolver metodologias para avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos no concelho de Castelo de Paiva, aprofundando o conhecimento na sua incidência espacial da instabilidade de vertentes. A área de estudo, com 115,04 Km², foi definida por apresentar condições favoráveis de predisposição natural de desabamentos, contexto litológico, estrutural e morfológico.

Neste trabalho conseguiu-se avaliar a dimensão espacial da suscetibilidade e aplicar metodologias de trabalho estatísticas que ainda não tinham sido utilizadas nesta área de estudo. O modelo de avaliação da suscetibilidade da instabilidade de vertentes foi organizado em 5 objetivos específicos que se procurou explicar nos capítulos que compõem esta dissertação.

Objetivo 1 - Elaboração do inventário das fontes de desabamentos com recurso a análise de ortofotomapas, validada com trabalho de campo.

A aplicação das técnicas e diferentes métodos de inventariação de movimentos de vertente permitiu identificar, cartografar e classificar 166 fontes de desabamentos no concelho de Castelo de Paiva. As fontes de desabamento apresentam uma área de 95550,22 m², o equivalente a 0,08% da área de estudo. A nível metodológico, demonstrou-se a importância e especificidade da realização de uma base de dados para registar as ocorrências das fontes de desabamentos que correspondeu para o sucesso da avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos. Considera-se que as metodologias utilizadas possibilitaram obter um inventário total de fontes de desabamentos robusto. Este inventário foi incorporado numa base de dados espacial em SIG, integrando uma proposta de base de dados para manter e atualizar. A interpretação de abruptos rochosos através de ortofotomapas exige por vezes um bom conhecimento do terreno, o levantamento de campo foi a melhor forma de confirmar ou anular os registos de fontes de desabamentos obtidos de forma indireta.

O trabalho de campo apresentou diversas vantagens, ficou comprovada a necessidade de trabalho sobre o terreno, o contacto direto com o objeto de estudo para aferir o trabalho de delimitação das fontes de desabamentos, a demarcação mais correta das fontes de desabamentos e o ajustamento dos critérios para a interpretação dos ortofotomapas. No entanto, o trabalho de campo representou um acréscimo de custos nas deslocações e em alguns casos de trabalho de campo não foi possível entrar em propriedades privadas ou áreas de difícil acesso.

Objetivo 2- Análise das relações da variável dependente, o inventário de fontes de desabamentos e um conjunto de fatores de predisposição

Na avaliação da suscetibilidade com todos os factores de predisposição, verificou-se que os desabamentos estão relacionados com vertentes muito declivosas, caracterizadas pela proximidade das cristas quartzíticas com abrupto rochoso (formação do quartzito armoricano) e localizam-se nas elevações mais altas do concelho, uma vez que tem a presença deste relevos de resistência.

Objetivos 3 e 4 - Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos (modelação e validação).

Na área de estudo aplicou-se uma análise estatística bivariada com base no método estatístico VI e validaram-se os resultados do zonamento da suscetibilidade de modo independente, com base numa partição aleatória das fontes de desabamentos.

Na avaliação da suscetibilidade o melhor desempenho obtido correspondeu ao ajuste do modelo de suscetibilidade do G1 com uma taxa de sucesso com um valor de AAC de 96,98% utilizando 50% das fontes de desabamentos. Na avaliação da capacidade preditiva, com base numa partição aleatória, que incrementa qualidade nas predições, o melhor desempenho foi realizado com a modelação com as fontes de desabamento do G2 e validado com as fontes de desabamentos do G1. Este modelo apresenta uma taxa de sucesso de 96,76% e uma taxa de predição de 96,36%. O modelo G2 é possível prever 90,56% e 97,39% dos futuros de desabamentos, respetivamente, nos 10% e 30% da área de estudo classificados como mais suscetíveis. Em comparação com o G2, o modelo G1 apresenta poucas diferenças entre taxas de sucesso e de predição são pouco significativas, em termos das AAC. Os mapas de suscetibilidade dos 2 modelos relativo ao padrão da suscetibilidade tendem a ser muito semelhantes.

A cartografia final e os resultados produzidos com este trabalho contribuem para a compreensão do concelho de Castelo de Paiva, proporcionando um instrumento de apoio aos agentes de proteção civil na identificação de áreas prioritárias de intervenção e sinalizar áreas passíveis de estudos de maior detalhe. Esta caracterização e avaliação metódica das suscetibilidade são passos fundamentais para desenvolver um instrumento de base no que respeita aos processos de planeamento de emergência e de ordenamento do território municipal.

Futuramente seria importante no futuro aplicar um modelo matemático a uma pequena área amostra do concelho, com a utilização de outros fatores de predisposição com aplicação

de um modelo de propagação de trajetórias dos blocos desabados em área onde estão localizadas habitações e rede viária. Não esquecendo que a identificação das áreas mais suscetíveis não deve ser considerada suficiente, especialmente se nestas existirem elementos expostos.

Objetivo 5 – Análise sensitiva da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos para determinar os fatores mais importantes à ocorrência de desabamentos, mediante ao peso diferenciado de cada variável independente, com recurso as taxas de sucesso.

Os factores de predisposição mais importantes utilizados na modelação da suscetibilidade a desabamentos, foram avaliados através de uma análise sensitiva. Através do procedimento de hierarquização dos factores de predisposição para a avaliação sensitiva do ajuste dos modelos de suscetibilidade, confirmou-se com a utilização de todos dos factores de predisposição utilizados na modelação, traduz-se progressivamente num melhor ajuste dos modelos preditivos. Hierarquicamente, a litologia com 95,1% de taxa de sucesso obtido isoladamente é o fator mais importante em todos os modelos. Os declives também têm uma relação fundamental com os desabamentos, que foi o segundo fator mais importante em todos os modelos. O uso do solo foi o fator de predisposição menos valorizado na modelação, prende-se da classe das florestas ter uma forte expressão territorial e não ser relevante para a queda de blocos.

Além das conclusões dos objetivos específicos, abrangente nos temas abordados, outros pontos são necessários retirar considerações finais. O tema escolhido, avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos, ficou demonstrado a atualidade, a necessidade de aprofundar e aplicar metodologias universalmente aceites para efetivamente obter resultados bastante satisfatórios. Relativo à área de estudo, o concelho de Castelo de Paiva, é um território em que a suscetibilidade a desabamentos merece especial atenção, pelo número de abruptos rochosos que foram inventariados. As características físicas da área de estudo, geomorfológicas e litológicas e após esta avaliação potenciam a ocorrência a desabamentos.

No trabalho prático desenvolvido, realça-se a utilização dos SIG na preparação da informação geográfica para caracterizar a área de estudo e na modelação da suscetibilidade. A modelação sem a utilização de um SIG, as tarefas iriam ser mais morosas e alguns procedimentos não se poderiam executar. Na aplicação do método adotado, foi fundamental a utilização de um método estatístico que apresentou uma capacidade de quantificar o grau da suscetibilidade na área de estudo e avaliar o peso dos fatores de predisposição na construção do modelo. Os mapas de suscetibilidade produzidos por este método estatístico presumem-se válidos para o território, se as condições do terreno se mantiverem.

Referências bibliográficas

- Aleotti, P. & Chowdhury, R. (1999) - Landslides hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin Eng. Geol. Env/Springer-Verlag*, nº 58, pp. 21-44.
- Blahut, J.; Van Westen, C. J.; Sterlacchini, S. (2010) - Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology* (119): pp. 36-51.
- Buma, J.; van Ash, T. (1996a) - Slide (rotational) In Dikau, R.; Brunsden, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. (Eds.), *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Chichester: pp. 43-61.
- Cabral, J. & Ribeiro, A. (1988) - Carta neotectónica de Portugal Continental, escala 1/1000000, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa
- Carrara, A. (1984) - Landslide Hazard mapping: aims and methods. *Colloque de Caen (BRGM)*, 83: 141 - 151.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991) - GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 427-445.
- Carson, M.A. & Kirkby, M.J. (1975) - *Hillslope Form and processes* - 2 ed. Malta: Cambridge University Press
- Clerici, A.; Perego, S.; Tellini, C.; Vescovi, P. (2010) - Landslide failure and runout susceptibility in the upper T. Ceno valley (Northern Apennines, Italy). *Natural Hazards*. 52: 1 - 29.
- Chaminé, H. I., & Gomes A. (2005) - Cartografia geológica e geomorfológica para a caracterização de riscos naturais à escala do planeamento regional: Aplicação ao concelho de Castelo de Paiva (NW de Portugal). *Xeográfica, revista de Xeografia, Território e Medio Ambiente*, 5
- Chung, C.-J.F., & Fabbri, A. (1999) - Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, 65, No. 12, 1389-1399.
- Chung, C. F., & Fabbri, A. G. (2003) - Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30, 451-472.
- Chung, C.-F.F., & Fabbri, A. G. (2005) - Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In T. Glade, M. Anderson, & M. J. Crozier (Eds.), *Landslide Hazard and Risk* (pp. 139-174). John Wiley and Sons.
- Chung, C., & Fabbri, A. G. (2008) - Predicting landslides for risk analysis - spatial models tested by a crossvalidation technique. *Geomorphology*, 94, 438-452.
- Chacón, J.; Irigaray, C.; Fernández, T.; El Hamdouni, R. (2006) - Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 65: 341 - 411.
- Costa, A.J.A.S. (2009) - A aplicabilidade dos SG e das imagens de Satélite na identificação de áreas com potencial Arqueológico: Estações Arqueológicas da idade do ferro. Dissertação de mestrado, Universidade do Porto
- Corominas, J., Remondo, J., Farias, P., Estevão, M., Zézere, J., Diaz de terán, J., Dikau, R., Schrott, L., Moya, J. & González, A. (1996) - Debris Flow. In R. Dikau, Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M.-L. (Ed), *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes* (pp.161-180): John Wiley & Sons. Chichester.

- CNREN (2010) - Harmonização de definições e para as várias tipologias de área integradas em REN critérios de delimitação Documento enquadrado pelo Decreto-Lei n.º 166/2008, de 22 de Agosto Secretariado Técnico da Comissão Nacional da Reserva Ecológica Nacional. [DT.01/2009.v2.0] | Abril de 2010.
- Cruden, D. M. (1991) - A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. (43): 27-29.
- Cruden, D. M.; Varnes, D. J. (1996) - Landslide types and processes in Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Eds.), *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board. National Academic Press, Washington D. C., Special Report 247: 36 - 75.
- Dorren, L., K., A. (2003) - A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography* (27, 1): 69 - 87.
- Fabbri, A. G.; Chung, C. F.; Jang, D. H. (2004) - A software approach to spatial predictions of natural hazards and consequent risks. *Risk Analysis* IV: 289 - 305.
- Dikau, R., Cavallin, A., & Jäger, S. (1996) - Databases and GIS for landslide research in Europe. *Geomorphology*, 15, 227-239.
- Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W.Z.; on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (2008) - Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology* (102): 99 - 111.
- Ferreira, N., Iglesias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A., & Ribeiro, M. (1987) - Granitóides da zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In F. Bea, & et. al, *Geologia de los Granitoides e Rocas Asociadas del Macizo Herpérico* (pp. 37-51). Madrid: Ed. Rueda.
- Flageollet, J.C.; Weber, D. (1996) - Fall in Dikau, R.; Brunsden, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. (Eds.), *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Chichester: 13-28.
- Frattoni, P.; Crosta, G.; Carrara A. (2010) - Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*. 111: 62 - 72.
- Garcia, R. A. (2002) - Avaliação do Risco de Movimentos de Vertente na Depressão da Abadia (Torres Vedras). Lisboa: Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ambiente, sob a orientação do Professor Doutor José Luís Zêzere, apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.
- Garcia, R., Zêzere, J., & Oliveira, S. (2007) - A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de suscetibilidade a movimentos de vertente. In *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos* (Vol. V, pp. 265-279). Lisboa.
- Gaspar, J., Goulart, C., Queiroz, G., Silveira, D., & Gomes, A. (2004) - Dynamic structure and data sets of a GIS database for geological risk analysis in the Azores volcanic islands. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4, pp. 233-242.
- Gomes, R. (2006) - Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da Combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa., Tese de Doutoramento. Universidade Federal de Rio de Janeiro

- Goosen, D. (1968) - Interpretacion de fotos aereas y su importancia en levantamiento de suelos. FAO, Boletín sobre Suelos 05, Roma
- Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; 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. (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 Mathematisch naturwissenschaftlichen Fakultät da Rheinischen Friedrich-Wilhelms, Universidade de Bona.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008) - The landslide handbook - A guide to understanding landslides. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325.
- Hutchinson, J. (1988) - General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides (Ed. BONNARD, C.), Vol. 1, Rotterdam: 3-35.
- Julião, P.; Nery, F.; Ribeiro, J.; Branco, M. & Zêzere, J. (2009) - Guia Metodológico para a Criação de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal. Autoridade Nacional de Protecção Civil: 20-65.
- Lemos de Sousa, M.J. (1978) - “O grau de incarbonização (‘rang’) dos carvões durienses e as consequências genéticas, geológicas e estruturais que resultam do seu conhecimento”, comunicações Serv.Geol.Port., Lisboa, vol 63. pp.179 - 365
- Medeiros, A.C.; Pilar, L. e Fernandes, AP. (1964) - “Carta geológica de Portugal na escala de 1/50 000, Notícia explicativa da folha nº 13-B, Castelo de Paiva”, Serviços Geológicos de Portugal, 61 pp.
- Montgomery, D. R.; Dietrich, W. E. (1994) - A physically-based model for topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, vol.30, 4: 1153-1171.
- Pereira, S. (2009) - Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto
- Piedade, A. (2009) - Modelação especial em Sistemas de Informação Geográfica da suscetibilidade a deslizamentos na área de Lousa – Loures. Dissertação de Mestrado em Gestão do Território, área de especialização em Deteção Remota e Sistemas de Informação Geográfica. F. C. S. H. Universidade Nova de Lisboa.
- Pinto de Jesus, A. (2001) - “Génese e evolução da Bacia Carbonífera do Douro (Estefaniano C inferior, NW de Portugal): um modelo”, Universidade do Porto, 2 volumes [Texto: 272 pp.; Atlas: 71 pp.]. (Tese de doutoramento, inédito).
- Presas, J.A.C. (2012) - Modelação da Suscetibilidade à Rotura e Propagação de Desabamentos na Arrábida. Dissertação de mestrado Geografia Física e Ordenamento do Território, apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Rebelo, F.M.S. (1975) - “Serras de Valongo. Estudo de geomorfologia”, Suplementos de Biblos, Universidade de Coimbra, vol.9, pp. 1-194. (Tese de doutoramento)
- Rebelo, F.M.S. (1984) - “Adaptações e inaptações às cristas quartzíticas do Noroeste Português”. In: Livro de Homenagem a Orlando Ribeiro, Centro de Estudos Geográficos, Lisboa, Vol.1, pp.321-331.

- Reis, E. J. M. (2006) - As bacias hidrográficas das ribeiras da serra de Grândola: dinâmica hidrológica e factores condicionantes. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Remondo, J., González, A., Dias de Terán, J. R., Cendrero, A., Fabbri, A., & Chung, C. J. (2003) - Validation of Landslide susceptibility maps: examples and applications from a case study in northern Spain. *Natural Hazards*, 30, 437-449. Ribeiro, O., Lautensach,
- Ribeiro, O.; Lautensach, H. e Daveau, S. (1987) - “Geografia de Portugal”. Vol. I – A posição geográfica e o território, Edições João Sá da Costa. Lisboa, pp.3-334.
- Ribeiro, A.; Quesada, C. e Dallmeyer, R.D. (1990) - “Geodynamic evolution of the Iberian massif”. In: dallmeyer, R.D. e Martinez-Garcia, E., Eds., Pre-Mesozoic Geology of Iberia Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, pp. 397-410.
- Simão, A.J.V. e Rodrigues de Carvalho, M.M., (1999) - Aplicação de modelos digitais de terreno ao estudo físico do território, ESIG’99
- Soeters R, Van Westen C. J. (1996) - Slope instability recognition, analysis and zonation. In Turner A. K., Schuster R. L, (Eds.) Landslides, investigation and mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247. National Academy Press, Washington D.C., U.S.A.: 129-177
- Sterlacchini, S.; Ballabio, C.; Blahut, J.; Masetti, M.; Sorichetta, A. (2011) - Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps. *Geomorphology*. 125: 51 – 61.
- Soeters, R., & van Westen, C. J. (1996) - Slope instability recognition, analysis and zonation. In A. K. Turner, & R. L. Schuster, Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247 (pp. 129-177). Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Pres
- Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2004) - A comparison of GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45, 665-679.
- Teixeira, C. (1981) - Geologia de Portugal. Precâmbrico-Paleozóico. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 629 pp.
- Teixeira, J. (2006) - Geomorfologia e morfotectónica de relevos quartzíticos: implicações na gestão de georrecursos. Dissertação de Mestrado em Minerais e Rochas Industriais, apresentada à Universidade de Aveiro. Aveiro
- Varnes, D. (1978) - Slope Movement Types and Processes. In: SCHUSTER, R. & KRIZEK, R. (eds.), Landslides-Analysis and Control: Transportation Research Board, Special Report N.º 176. Chapter 2, Washington DC: 11-28.
- Van Den Eeckhaut, M.; Reichenbach, P.; Guzzetti, F.; Rossi, M. and Poesen, J. (2009) - Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on diferente mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards Earth System Sciences* (9): 507 – 521.
- Van Den Eeckhaut; M.; Hervás, J.; Montanarella, L. (2010) - Validation of landslide inventory, susceptibility and hazard maps for risk management. 2nd International Workshop on validation of Geo-Information products for crisis management. 11-13 October 2010, Italy, EUR24530 EN – 2010, European Union: 41-49.

- Van Westen, C. (2000) - The modelling of landslide hazards using GIS. *Surveys in Geophysics*, 21, 241-255.
- Van Westen, C. J., Rengers, N. & Soeters, R. (2003) - Use of Geomorphological information in indirect landslide Susceptibility Assessment Natural Hazards Volume 30 pp.399-419.
- Wagner, R.H.; Lemos de Sousa, M.J. (1983) - "The Carboniferous megafloras of Portugal; A revision of identifications and discussion of stratigraphic ages". In: Lemos de Sousa, M.J. e Oliveira, J.T., The carboniferous of Portugal. Memórias Serv. Geol. Portg., Lisboa, vol.29, pp. 127-152
- Wieczorek, G. F. (1996) - Landslides triggering mechanisms. In A. K. Turner, & R. L. Schuster, Landslides investigation and mitigation (Vols. Special report 247, Transportation Research Board, pp. 76-90). Washington D.C.: NationalAcademy Press.
- Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993) - Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies, Canadian Geotechnical Society (ed.), Richmond, BiTech Publishers Ltd.
- WP/WLI - (International Geotechnical Societies) 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. 47: 53-57.
- WP/WLI - (International Geotechnical Societies) Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993b) - Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies.
- Yan, T. Z. (1988) - Recent advances of quantitative prognoses of landslides in China in Bonnard, C. (Ed.) Landslides. Proceedings of the 5th ISL, Lausanne. Vol. 2. Balkema, Rotterdam: 1263 - 1268.
- Yin, K. L.; Yan, T. Z. (1988) - Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks in Bonnard, C. (Ed.) Landslides. Proceedings of the 5th ISL, Lausanne. Vol. 2. Balkema, Rotterdam: 1269 - 1272.
- Zêzere, J. (1997) - Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa. Dissertação de Doutoramento apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Zêzere, J. (2000) - A Classificação dos Movimentos de Vertente Tipologia, Actividade e Morfologia. Apontamentos de Geografia - Série de Investigação: N.º6. Centro de Estudos Geográficos, Lisboa.
- Zêzere, J. L.; Reis, E.; Garcia, R.; Cruz de Oliveira, S.; Rodrigues, M. L.; Vieira, G. 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 Hazard and Earth System Sciences. (4): 133-146.
- Zêzere, J. (2005) - Dinâmica de vertentes e risco geomorfológico. Centro de Estudos Geográficos, Relatório N.º41, Lisboa.
- Zêzere, J.L. (2006) - Predição probabilística de movimentos de vertente na escala regional. Actas de las Jornadas sobre terrazas y Prevención de riesgos naturales, 17-30.

- Zêzere, J. L. (2007) - Predição Probabilística de Movimentos de Vertente na Escala Regional. Actes des Jornades sobre Terrasses i Prevenció de Riscos Naturais. Department de Medi Ambient, Consell de Mallorca:17-30
- Zêzere, J. (2007a) - Riscos e Ordenamento do Território. Inforgeo, 20/21, Ordenamento Territorial, Associação Portuguesa de Geógrafos: 59-63.
- 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.; e Equipa Sectorial de Riscos e Protecção Civil e Reflexão sobre Alterações Climáticas (2010) - Diagnóstico Sectorial. Documento de trabalho elaborado no âmbito do Plano Regional de Ordenamento do Território da Área Metropolitana de Lisboa (PROTAML). CCDRLVT. Relatório não publicado.
- Zêzere, J. L.; Ramos, C.; Reis, E.; Garcia, R.; Oliveira, S. (2008c) - Diagnóstico estratégico. Riscos e Protecção Civil. Documento de trabalho elaborado no âmbito do Plano Regional do Oeste e Vale do Tejo. CCDRLVT. Relatório não publicado.