

Joana Filipa Costa Fernandes

2º Ciclo de Estudos em Riscos Cidades e Ordenamento do Território

Modelação de Processos Erosivos no Alto Douro Vinhateiro: o caso de estudo
da Quinta de S. Luiz

2014

Orientador: Laura Maria Pinheiro de Machado Soares

Coorientador:

Classificação: Ciclo de estudos:

Dissertação:

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação contou com o apoio e colaboração de várias pessoas e instituições às quais quero expressar o meu sincero reconhecimento.

À Professora Doutora Laura, pela orientação, transmissão de conhecimento, celeridade e assertividade nas críticas e sugestões, ao longo da realização da presente dissertação. Todas as palavras são poucas para descrever a disponibilidade, carinho, simpatia e motivação que demonstrou, nos momentos mais difíceis. Por esse motivo dedico-lhe um especial agradecimento.

Ao Professor Doutor Carlos Bateira, pelo apoio, ensinamentos e esclarecimento, sobretudo na modelação de alguns fatores da RUSLE, não descurando as condições que proporcionou para a realização de trabalho de campo, bem como as palavras de motivação ao longo deste percurso.

À Ana Faria e Ana Sofia Oliveira, pelo companheirismo e ajuda ao longo deste trabalho, particularmente na fase inicial de levantamento de campo. O esforço, disponibilidade e troca de saberes revelaram-se fulcrais na consolidação de conhecimento. Agradeço-vos a verdadeira amizade e todas as recordações que construímos juntas.

Aos Mestres Manuel Teixeira e Carlos Hermenegildo pelo auxílio na realização de trabalho de campo e tratamento de dados, em ambiente de laboratório. Agradeço especialmente pela transmissão de experiência e pela boa disposição empregue em todas as tarefas.

Ao António Leitão pela ajuda no processo de inventariação de campo e pela troca de ideias no que concerne ao tema da dissertação.

Ao Professor Doutor António Alberto Gomes, pela sugestão imprescindível do software SAGA GIS e por todas as palavras de apoio que me dedicou.

À Mestre Mónica Santos, pela excelente cedência de conhecimentos relativamente ao tratamento de dados meteorológicos, procedimentos essenciais para a aplicação da modelação.

A todos os Professores do Departamento de Geografia que contribuíram para a apreensão e consolidação de saberes ao longo destes dois anos.

À Associação para o Desenvolvimento da Viticultura Duriense (ADVID), pela disponibilidade de dados meteorológicos e cartográficos, em particular aos Engenheiros

José Manso e Márcio Nóbrega, da Quinta de S. Luiz e ao Engenheiro Álvaro Martinho da Quinta das Carvalhas, pela receptividade e acompanhamento no trabalho de campo.

Agradeço a oportunidade de integrar o projeto ModRis/ADVID que me possibilitou adquirir competências vastas a nível profissional.

Às minhas amigas Rita Silva, Rita Costa, Carina Duarte, Sara Mateus, Inês Magalhães e Mafalda Brandão pela amizade incondicional, apoio e palavras de incentivo em todos os momentos. Agradeço-vos por fazerem parte da minha vida.

Por último e mais importante, à minha família, especialmente aos meus pais e ao meu irmão, expresso a minha eterna gratidão pelo amor incondicional, apoio e compreensão em todo o meu percurso académico e pessoal. Sem o esforço deles não seria possível a conclusão deste longo percurso. A eles dedico a minha dissertação.

RESUMO

Palavras-chave: Erosão Hídrica; Modelação; RUSLE; SIMWE; Alto Douro

A paisagem cultural do Alto Douro Vinhateiro (ADV) - que integra a mais antiga região vitícola regulamentada do mundo - faz parte, desde 2001, do Património Mundial reconhecido pela UNESCO. A Quinta de S. Luiz dedica a generalidade da sua área de ocupação à produção de vinho, baseada num sistema onde prevalece a armação de terreno em patamares com taludes de terra.

Neste sentido, o principal objetivo deste trabalho centra-se na avaliação da suscetibilidade à erosão por escorrência, visando identificar os pontos mais críticos, para que seja possível melhorar os sistemas de proteção e drenagem dos solos e, assim, mitigar potenciais danos.

Para tal, recorreu-se a uma sequência metodológica que combina ensaios de campo e laboratoriais para a recolha de um vasto conjunto de parâmetros que condicionam a erosividade e erodibilidade dos solos, permitindo a modelação dos processos erosivos e a elaboração da respetiva cartografia de suscetibilidade.

A modelação de base física baseou-se na aplicação e comparação da (R)USLE, (Equação Universal Revista de Perda de Solos), segundo cinco diferentes algoritmos de cálculo do fator LS, e do modelo SIMWE (SIMulated Water Erosion). Realizam-se estes procedimentos utilizando um modelo digital de superfície de grande pormenor (resolução de 1 metro), combinado com a integração, em Sistemas de Informação Geográfica (ArcGis, SAGA GIS e GrassGis). Com base no inventário das ocorrências procede-se à aplicação do modelo estatístico de regressão logística e validação da modelação obtida.

Dos resultados obtidos verifica-se que os valores de suscetibilidade alta à perda de solo anual, calculados na (R)USLE, coadunam-se com as áreas onde foram registadas feições erosivas e se sucederam os três eventos de intempéries identificados pela Associação para o Desenvolvimento da Viticultura Duriense (ADVID), apresentando um valor de validação estatística bastante fiável face à realidade. Relativamente ao SIMWE, este ilustra quantitativamente os parâmetros envolvidos no processo erosivo, onde se observa que as áreas passíveis de ser associadas a uma maior perda de solo se conciliam com as áreas de suscetibilidade alta estabelecidas na (R)USLE, concluindo assim que este modelos se complementam.

ABSTRACT

Keywords: water erosion; modelling, RUSLE; SIMWE; Douro Valley

The cultural landscape of the Douro Valley Wine Region (DVWR) – which integrates the oldest regulated wine region of the world – belongs, since 2011, to the UNESCO's World Heritage site. The Saint Luiz Farm dedicates its area to the wine production, based on terraces system where frame grounds and earth embankments are widely present.

So, the main aim of this project prevails on the evaluation of the susceptibility of the erosion caused by runoff, pointing out the weakest spots to improve the protection systems and the land drains, therefore, to prevent potential damages.

In order to achieve this was used a methodological sequence which combines field and laboratorial trials to collect a wide range of parameters which restrain the soil erosion, allowing the modelling of erosive processes and the elaboration of the susceptibility cartography.

The physic basic modelling was based on the application and comparison of the RUSLE, stepping five different algorithms of the LS factor and the SIMWE model. These procedures are performed by a digital model with a detailed surface (resolution of one meter), combined with Geographic Information Systems (ArcGis, SAGAGIS e GrassGis). Based on the occurrences inventory, the statically model of logistic regression and the modelling validation are preceded.

Through the final results is conclude that the high susceptibility values of the annual soil loss, calculated in the RUSLE, team up with the areas where the erosion was found and the three steps identified by ADVID were succeeded. This value was very reliable. Regarding SIMWE, this model illustrates quantitatively the involved parameters of the erosion process, which can be observed that the areas associated to a major soil loss associate with the high susceptibility areas in RUSLE. These models complement each other, that's the final conclusion.

ÍNDICE

ABSTRACT	VI
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO I - ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL E ESTADO DA ARTE	5
1. EROSÃO HÍDRICA DO SOLO: DEFINIÇÃO E TIPOLOGIA DOS PROCESSOS	5
1.1. IMPACTO DAS GOTAS DE ÁGUA NO SOLO	6
1.2. EROSÃO LAMINAR	7
1.3. EROSÃO EM SULCOS	8
1.4. EROSÃO EM RAVINAS	10
1.4.1. TIPO DE RAVINAS	13
1.5. EROSÃO EM TÚNEIS	19
1.6 BREVE SÍNTESE	19
2. FATORES CONDICIONANTES DA EROSÃO HÍDRICA	20
2.1. COMPONENTES, TIPOLOGIA E MODELOS DE PRODUÇÃO DO ESCOAMENTO	20
2.2. CARACTERÍSTICAS DAS VERTENTES	25
3. MODELOS APLICADOS AO ESTUDO DA EROSÃO HÍDRICA DE SOLOS	32
3.1. TIPOS DE MODELOS	33
3.1.1. MODELOS EMPÍRICOS	35
3.1.2. MODELOS CONCEPTUAIS	37
3.1.3. MODELOS DE BASE FÍSICA	38
3.1.4. MODELOS SEMI-QUANTITATIVOS	40
3.2. CONSIDERAÇÕES EM TORNO DA UTILIZAÇÃO DOS SIG NA MODELAÇÃO DA EROSÃO	41
4. ESTUDOS EFETUADOS NO ÂMBITO DA EROSÃO HÍDRICA DOS SOLOS	42
4.1. REFERÊNCIAS DE ÂMBITO INTERNACIONAL	42
4.2. ESTUDOS DESENVOLVIDOS EM PORTUGAL	46
CAPÍTULO II - METODOLOGIA UTILIZADA NA AVALIAÇÃO DA EROSÃO HÍDRICA DE SOLOS: INFORMAÇÃO DE BASE E CARACTERIZAÇÃO GERAL DOS MODELOS APLICADOS	50
1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	50
2. INFORMAÇÃO DE BASE	53
2.1. A EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO	55
2.1.1. FATOR EROSIVIDADE (R)	56
2.1.2. FATOR DE ERODIBILIDADE (K)	58
2.1.3. FATOR TOPOGRÁFICO (LS)	61
2.1.4. FATOR COBERTURA DO SOLO (C)	65

2.1.5. FATOR PRÁTICA AGRÍCOLA (P).....	67
2.2. SIMULATED WATER EROSION (SIMWE)	68
2.3. MODELO PREDITIVO: REGRESSÃO LOGÍSTICA.....	72
2.4. PROCEDIMENTO DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS	74
CAPÍTULO III - ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO	76
1. A REGIÃO DEMARCADA DO DOURO	76
1.1. O VALE DO DOURO E A RDD: CONTEXTO MORFOESTRUTURAL	77
1.2. SOLOS E USO DO SOLO	85
CAPÍTULO IV - MODELAÇÃO E CARTOGRAFIA DOS PROCESSOS	90
1. INVENTARIAÇÃO DAS FEIÇÕES EROSIVAS NA QUINTA DE S. LUIZ	90
2. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA (R)USLE NA QUINTA DE S. LUIZ	91
2.1. FATOR EROSIVIDADE (R)	91
2.2. FATOR ERODIBILIDADE (K)	92
2.3. FATOR TOPOGRÁFICO (LS)	93
2.4. FATOR COBERTURA DO SOLO (C)	95
2.5. FATOR PRÁTICA AGRÍCOLA (P).....	96
2.5.1. EROÇÃO HÍDRICA POTENCIAL.....	98
2.5.2. EROÇÃO HÍDRICA REAL - (R)USLE	100
2.7. VALIDAÇÃO.....	106
3.RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO SIMWE NA QUINTA DE S. LUIZ	107
3.1. COMPARAÇÃO ENTRE A RUSLE E O SIMWE	112
DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÃO	113
BIBLIOGRAFIA	116
ANEXOS	131
1. MODELOS EMPÍRICOS	131
2. MODELOS CONCETUAIS	132
3. MODELOS DE BASE FÍSICA	133
4. MODELOS SEMI-QUANTITATIVOS	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema metodológico.....	3
Figura 2 - Inter-relação entre os fatores que condicionam a erosão. Extraído de Soares, 2008. .5	
Figura 3 – Efeito do impacto das gotas de água no solo e feições erosivas derivadas (pedestais).	6
Figura 4 - Exemplo de erosão laminar.	8
Figura 5 - Erosão por sulcos na Quinta de S. Luiz	9
Figura 6 - Microravina na Qtª de S. Luiz	10
Figura 7 - Fases de desenvolvimento das ravinas. Extraído de Morgan, 1986.	11
Figura 8 - Perfil da vertente ilustrando os processos de erosão do solo conforme a descrição de Horton (1945),Extraído de Stabile, 2013.	12
Figura 9 - Tipo de ravinas..	14
Figura 10 - Contextos topográficos do surgimento de ravinas. Extraído de Bergonse e Reis, 2011.	15
Figura 11 - Variação da carga de sedimentos e capacidade de transporte ao longo de uma ravina efémera com perfil (A) côncavo e (B) convexo (Foster, 1982).	16
Figura 12 - Figura 12 - Relação entre o escoamento concentrado (Q) e a largura média de canais (W) de diferente tipo. Extraído de de Poesen et al., 2003.	17
Figura 13 - Perfil longitudinal de vários tipos de cabeceiras de ravinas. Extraído de Oostwoud-Wijdenes et al. (1999).	18
Figura 14 - Componentes do Escoamento. Adaptado de Ward, 1975.	21
Figura 15 - Visão macroscópica e concentrada dos caminhos preferenciais na geração de escoamento numa vertente (Dunne, 1978). Extraído de Mediondo e Tucci (1997).	23
Figura 16 - Principais mecanismos de geração de escoamento. Extraído de Mediondo e Tucci, 1997.	24
Figura 17 - Relação entre substrato, formação superficial e solo. Extraído de Soares, 2008.	25
Figura 18 - Topografia de uma cabeceira de drenagem com a representação dos segmentos de encosta propostos por Hack e Goodlett (1960). Extraído de Moura et al.,1991.	27
Figura 19 - Classificação de quatro formas de vertentes segundo a curvatura Adaptado de Silveira, 2010.	27
Figura 20 - Fluxo de água no plano de curvatura (setas descontínuas) e no perfil da curvatura da vertente (setas contínuas). Extraído de Silveira, 2010.	28
Figura 21 - Nove unidades hipotéticas do modelo de segmentos de vertentes. Extraído de Silveira, 2005.	29
Figura 22 - Unidade ideal do relevo e as suas componentes elementares (Colangelo, 2011). ...	30
Figura 23 - Classificação dos fluxos hídricos superficiais. (Colangelo, 2011).	31
Figura 24 - Critérios de classificação dos modelos, processos contemplados e principais dados de input.	35
Figura 25 - Esquema metodológico da (R)USLE.	52
Figura 26 - Esquema metodológico do SIMWE.	52
Figura 27 - Ficha inventário de feições erosivas na Quinta de S. Luiz.	53
Figura 28 - Fatores que afetam a erosão hídrica do solo. Adaptado de Ferreira, 2008.	56
Figura 29 - Esquema metodológico do fator R.	57
Figura 30 - Textura do Solo na Quinta de S. Luiz.	59

Figura 31 - Esquema de cálculo do fator K.	60
Figura 32 - Classes do uso do solo LandCover – Corine e respetivo valor do fator C (Pimenta,1998).....	67
Figura 33 - Path sampling solution of the continuity equation for water depth $h(r)$ using duality between particle and field representation: a) water depth at 1 minute,b) water depth after 24 minutes. The grid is 416x430 cells at 10m resolution, Mitasova e Mitas (1998).	70
Figura 34 - - Módulos de cálculo do modelo SIMWE no Grass Gis.	71
Figura 35 - Sequência metodológica do módulo r.sim.water.	72
Figura 36 - Sequência metodológica do módulo r.sim.sediment.	72
Figura 37 - Localização da área em estudo.....	76
Figura 38 - Zonas Estruturais de Portugal Continental	78
Figura 39 - Formações Geológicas da Quinta de S. Luiz.....	79
Figura 40 – A. Hipsometria da RDD e da ADV. B. Declives da área envolvente da Quinta de S. Luiz.	81
Figura 41 - Enquadramento climático da RDD. Fonte: (Daveau, 1977); (Atlas do Ambiente).....	82
Figura 42 - Precipitação média mensal. Fonte: estação meteorológica de Adorigo, 1982-2012.	83
Figura 43 - Intempéries na Qtª de S. Luiz	84
Figura 44 - Ocupação do solo na Região Demarcada do Douro	86
Figura 45 - Uso do Solo na Qtª de S. Luiz.....	88
Figura 46 - Sistemas de armação de terreno na Qtª de S. Luiz.	89
Figura 47 - Inventário de feições erosivas na Quinta de S. Luiz.	90
Figura 48 - Tipologia das feições erosivas na Quinta de S. Luiz.	91
Figura 49 - Características físicas do solo da área de estudo e determinação do fator K.....	93
Figura 50 - Fator LS calculado com cinco algoritmos diferentes.....	94
Figura 51 - Exposições e Curvatura.....	95
Figura 52 - Fator Coberto do Solo (C).	96
Figura 53 - Fator P na Qtª de S. Luiz.	97
Figura 54 - Declives da Qtª de S. Luiz.	97
Figura 55 - Erosão Potencial na Qtª de S. Luiz segundo diferentes algoritmos de LS	99
Figura 56 - Erosão Real na Qtª de S. Luiz segundo diferentes algoritmos do fator LS	102
Figura 57 - Regressão Logística aplicada à RUSLE na Quinta de S. Luiz segundo diferentes algoritmos do fator LS.	104
Figura 58 - Validação aplicada ao modelo de Regressão Logística.	106
Figura 59 - Resultados do Modelo SIMWE: a) Water Depth; b) Sediment Concentration; c) Net Erosion Deposition.	109
Figura 60 - Resultados do Modelo SIMWE: d) Sediment Flux; e) Water discharge; f) Transport Capacity.....	110
Figura 61 - Resultados do Modelo SIMWE: g) Transport Limited Erosion-Deposition; h) Simulation Error.	111

ÍNDICE DE TABELAS

Quadro 1 -Características dos diferentes subtipos do processo de erosão hídrica do solo. Modificado de Laflent et al. (1985).	20
Quadro 2 - Tipos de modelos de erosão segundo Morgan1986. Adaptado de Tomás (1993)....	33
Quadro 3 Valores do Fator P de acordo com Tomás (1993). Extraído de Meneses, 2011.	68
Quadro 4 - Matriz de confusão/Tabela de contingência (Fawcett, 2006).	75
Quadro 5 - Período de retorno e probabilidade extrema associados a eventos de precipitação	84
Quadro 6 - Percentagem de ocupação de Uso do Solo	88
Quadro 7 - Percentagem de ocupação de sistemas de armação de terreno.	89
Quadro 8 - Precipitação média mensal e anual da série de precipitação entre 1983-2012, média mensal do índice de erosão e fator de erosividade.	92
Quadro 9 - Percentagem de feições erosivas por classe de suscetibilidade.	100
Quadro 10 - Percentagem da Erosão Potencial segundo cinco algoritmos, considerando a área total da Qtª de S.Luiz (127,97 ha).....	100
Quadro 11 - Percentagem de Erosão Real segundo cinco algoritmos, considerando a área total da Qtª de S.Luiz (127,97 ha).	101
Quadro 12 - Percentagem de feições erosivas por classe de suscetibilidade.	101
Quadro 13 - Comparação entre a Erosão Hídrica Real e Potencial em ton.ha ⁻¹ . ano ⁻¹	101
Quadro 14 - Coeficientes de regressão logística da (R)USLE.	103
Quadro 15 - Percentagem de perda de solo anual por classe de suscetibilidade com o modelo de Regressão Logística.	105
Quadro 16 - Percentagem de feições erosivas por classe de suscetibilidade.	105
Quadro 17 - Coeficientes de validação da Matriz de Confusão.	107
Quadro 18 - Resultados do Modelo SIMWE.	108
<i>Quadro i - Modelos empíricos.</i>	<i>131</i>
<i>Quadro ii – Modelos Concetuais.</i>	<i>132</i>
<i>Quadro iii - Modelos de base física.</i>	<i>133</i>
<i>Quadro iv(Continuação) Modelos de base física.</i>	<i>134</i>
<i>Quadro v - Modelos de base física.</i>	<i>134</i>
<i>Quadro anexo vi Modelos de base física.</i>	<i>135</i>
<i>Quadro anexo vii - Modelos Semi-quantitativos.</i>	<i>135</i>

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica é considerada uma das principais formas de degradação dos solos, assumindo particular relevância em áreas de clima mediterrâneo, em que, às características do regime das precipitações se associam fatores como a topografia acidentada e uma longa história de ocupação humana, implicando uma profunda remodelação de alguns territórios de forma a rentabilizar a produtividade dos solos. Esta remodelação implicou frequentemente a ‘criação’ do próprio solo através de técnicas de surribo e levantamento de terraços com muros de pedra, conjugados com dispositivos de drenagem destinados a assegurar a alimentação das culturas, mas, também, a garantir a sua proteção dos efeitos do escoamento superficial.

Esta descrição aplica-se de forma clara à Região Demarcada do Douro (RDD) e, no seu contexto, ao Alto Douro Vinhateiro (ADV), onde o quadro natural definido pelas vertentes abruptas do vale do rio Douro se conjugou com o engenho e necessidade das suas populações, para dar origem a uma paisagem cultural, ‘viva e evolutiva’, reconhecida como Património da Humanidade desde Dezembro de 2001 (Aguiar, 2002).

Da justificação deste reconhecimento faz parte, entre outros elementos, o complexo sistema tradicional de armação de terreno – abrangendo os designados terraços pré e pós-filoxéricos, ambos com muros de pedra em seco – que as necessidades de mecanização tendem a substituir por patamares com taludes de terra ou pela vinha ao alto em setores de menor declive. Esta circunstância tem motivado algumas críticas, que apontam a descaracterização da área como principal resultado, assim como se refere o agravamento dos processos erosivos (Pedrosa *et al.*, 2004). A esta questão respondem os produtores com novas técnicas de intervenção – como o ‘enrelvamento’ dos taludes e das entrelinhas da vinha com vegetação espontânea –, salientando a necessidade de conciliar a preservação da identidade da RDD com imperativos socioeconómicos, numa perspetiva de desenvolvimento sustentável (Magalhães, 2012).

Vários estudos e projetos têm sido implementados neste contexto, designadamente no âmbito dos processos de instabilidade geomorfológica (movimentos de vertente e erosão hídrica), que frequentemente implicam a destruição de muros ou a degradação dos taludes de terra por sulcagem e ravinamento, provocando, todos os anos, graves

prejuízos. Nesse sentido, uma das mais importantes aspirações dos proprietários agrícolas, é perceber de que forma devem atuar para prevenir tais ocorrências, o que exige o conhecimento dos processos, dos fatores que os condicionam e, conseqüentemente, das áreas mais suscetíveis. Esta definição permitirá sustentar a tomada de decisões relativamente às técnicas a implementar, ou, em última análise, destinar essas áreas a usos diferenciados.

É precisamente neste domínio que se integra a presente dissertação, visando uma avaliação da suscetibilidade à erosão hídrica de solos no Alto Douro Vinhateiro. Assim, enquadrando-se no Projeto MODRIS (*Suscetibilidade a processos hidrogeomorfológicos no Norte de Portugal: modelação matemática de base física e de base estatística*) - desenvolvido a partir de um protocolo assinado entre a *Associação para o Desenvolvimento da Viticultura Duriense* (ADVID) e o Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade do Porto (FLUP), sob coordenação do Professor Carlos Bateira - o objetivo principal deste trabalho relaciona-se com a predição dos sectores mais suscetíveis à erosão hídrica na Quinta de S. Luiz (Adorigo, Tabuaço), uma das áreas experimentais que integram o referido projeto.

Para o efeito foi seguida uma sequência metodológica (fig.1) que envolveu a recolha e consulta de bibliografia, o reconhecimento do terreno, a inventariação dos processos/feições erosivas e a aquisição de informação através de ensaios laboratoriais e *in situ*, a partir dos quais foi aplicada a *Equação Universal de Perda de Solos* (EUPS ou USLE na versão original) e o Modelo de Erosão e Deposição por Escoamento Superficial, (SIMWE - *Simulated Water Erosion*). Em ambos foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (MDE) de grande pormenor (resolução de 1 metro), processando-se todos os cálculos necessários em Sistema de Informação Geográfica (SIG), designadamente no ArcGis e no *open source* Grass Gis (*Geographic Resources Analysis Support System*). Posteriormente aplicou-se o modelo estatístico de Regressão Logística à RUSLE e procedeu-se à sua validação.

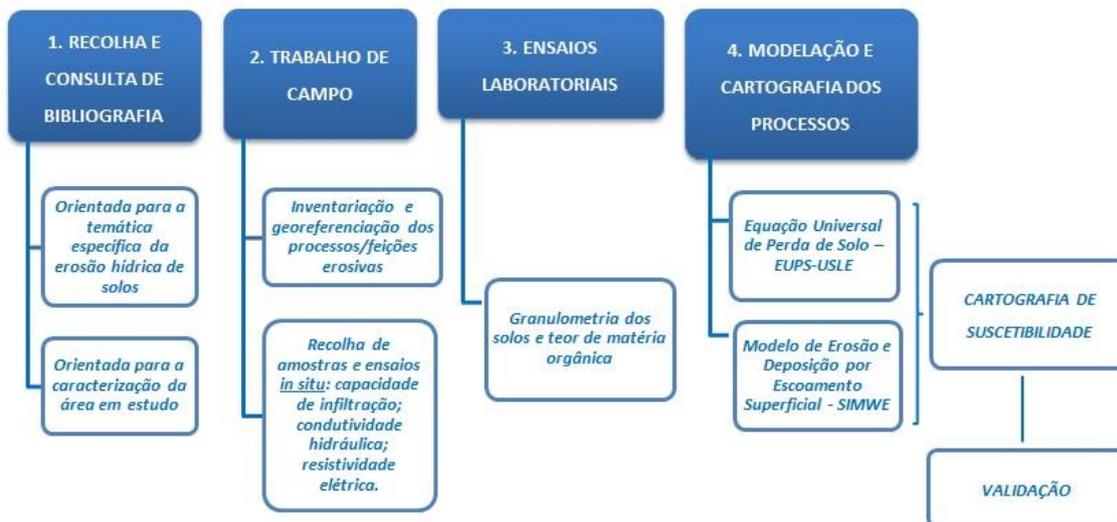


Figura 1 - Esquema metodológico.

De acordo com o objetivo e metodologia definidos, a nossa dissertação encontra-se subdividida em quatro capítulos. O primeiro contempla o enquadramento conceptual, abordando questões relacionadas com os processos de erosão hídrica do solo. Com este propósito, faz-se uma alusão à tipologia e processos de erosão hídrica, às propriedades do solo que condicionam a erosão, discutindo-se ainda as fontes e componentes do escoamento numa abordagem à hidrologia de vertentes, em que se destacam os principais modelos e tipologia de fluxos. Concluindo-se com uma breve resenha dos estudos e projetos de investigação desenvolvidos no âmbito do tema em análise, com especial destaque para os que foram implementados na Península Ibérica.

O segundo capítulo é dedicado à metodologia aplicada para prossecução do objetivo da presente dissertação. Por conseguinte, apresenta-se a sequência metodológica atrás brevemente referida, combinando ensaios de campo e laboratoriais necessários à determinação de alguns parâmetros que condicionam a erosividade e erodibilidade dos solos, o que nos permitiu a modelação dos processos erosivos e a elaboração da respetiva cartografia de suscetibilidade. Assim sendo, descrevem-se os procedimentos de aplicação dos modelos (USLE e SIMWE), assim como o modelo preditivo, de regressão logística, e o modelo de validação, que permite confirmar os resultados do modelo preditivo.

No terceiro capítulo, apresenta-se o enquadramento da área de estudo, explanando de uma forma breve aspetos relacionados com a tectónica, geologia, clima, morfologia e uso do solo.

No quarto e último capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados relativos à erosão hídrica na Quinta de S. Luiz, derivados da aplicação dos dois modelos. Para além disso, é feita uma comparação entre a erosão hídrica potencial e real e a análise de resultados do modelo preditivo e da respetiva validação.

Seguem-se as considerações finais, onde se pretende responder ao objetivo principal da dissertação, apontando-se ainda futuras linhas de investigação.

CAPÍTULO I - ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL E ESTADO DA ARTE

1. EROSÃO HÍDRICA DO SOLO: DEFINIÇÃO E TIPOLOGIA DOS PROCESSOS

A erosão hídrica do solo, em senso lato, pode ser definida como o ‘processo’ de destacamento ou remoção de partículas por ação da precipitação e do escoamento superficial, assumindo maior ou menor intensidade em função das características intrínsecas dos materiais e do meio sobre o qual atua (Selby, 1993; Grimm *et al.*, 2002).

Assim, como refere Soares (2008), a erosão é condicionada por um conjunto de fatores que atuam de forma integrada, dependendo, por um lado, da quantidade/duração/intensidade da precipitação e da forma como se processa o escoamento (fatores de erosividade) – que em parte controlam o tipo de processos que serão desencadeados - e, por outro, de parâmetros relacionados com os materiais e o contexto morfoestrutural e antrópico em que se enquadram (fatores de erodibilidade), influenciando a maior ou menor suscetibilidade à atuação dos processos erosivos (fig.2).

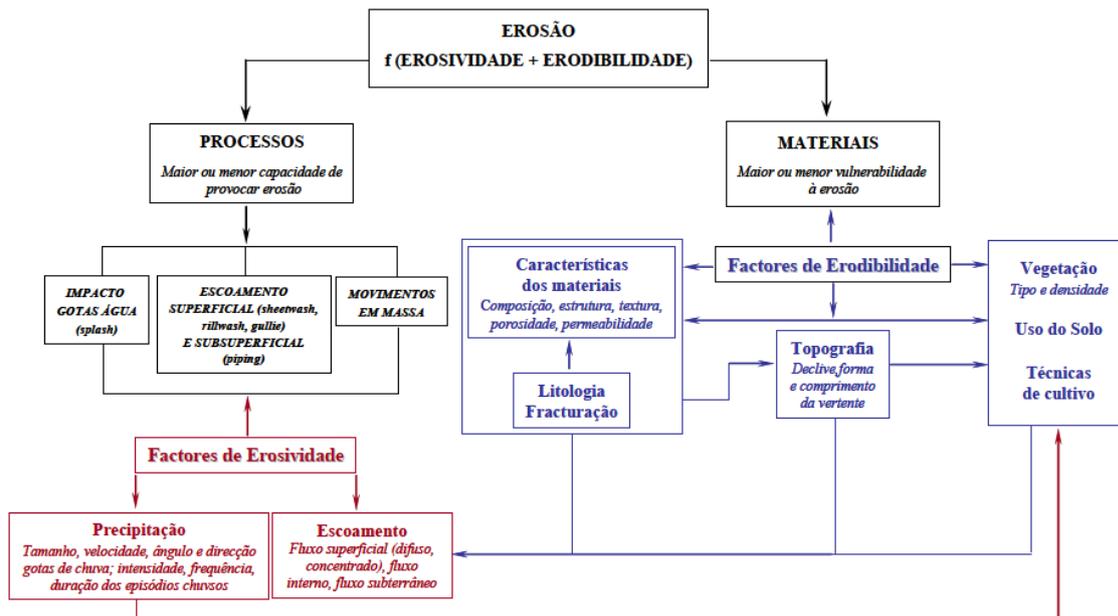


Figura 2 - Inter-relação entre os fatores que condicionam a erosão. Extraído de Soares, 2008.

Neste contexto, Morgan (1986) considera que a erosão hídrica dos solos pode ser subdividida em duas fases principais, correspondendo a primeira ao ‘desprendimento’ de partículas individuais do solo, essencialmente através do impacto das gotas de água (*raindrop impact* ou *rainsplash*) e, a segunda, ao seu transporte através do que se

designa fluxo superficial (*overland flow* ou *rainflow*). Quando não existe energia suficiente para que o movimento das partículas se mantenha ocorre a deposição, que pode assim ser considerada a terceira fase do processo erosivo (s.l.). Renard e Foster (1983) referem ainda que a carga de sedimentos tende a aumentar com o desprendimento de partículas da vertente, desenvolvendo-se igualmente a capacidade de transporte à medida que o escoamento se acumula e circula a favor do declive, iniciando-se a deposição quando este diminuiu, quando cessa o escoamento ou se alteram as condições da superfície do solo.

Podemos assim considerar, de acordo com Bryan (2000), que o impacto da precipitação e a energia associada ao escoamento são os principais agentes da erosão hídrica, que pode ser subdividida em cinco subprocessos - identificados no terreno pelas feições erosivas associadas – designadamente: o já referido impacto das gotas de água da chuva no solo (*rainsplash/raindrop erosion*); a erosão em manto ou erosão laminar (*sheetwash/sheet erosion*), que associado ao primeiro definem a designada erosão entre sulcos (*interrill erosion*); a erosão em sulcos (*rill erosion*), que corresponde a uma fase ‘incipiente’ da erosão linear; a erosão em ravinas (*gully erosion*), que vai dar origem a feições de características diferenciadas a que por vezes correspondem termos distintos (i.e. ravinas efémeras/ravinas permanentes); finalmente a erosão em túneis ou canais subterrâneos (*pipe erosion*), tipologia que surge normalmente associada ao escoamento subsuperficial (*interflow*).

Antes de procedermos a uma breve caracterização destes subprocessos, parece-nos importante referir que cada um deles (...) *can act in isolation, but all are commonly active on hillslopes, either sequentially or simultaneously* (Bryan, *ob.cit.*, p.387).

1.1. IMPACTO DAS GOTAS DE ÁGUA NO SOLO

Na erosão hídrica, a desagregação das partículas do solo é provocada pela energia do impacto das gotas de chuva e pela tensão cisalhante do escoamento superficial, podendo considerar-se, na perspetiva integrada acima referida, que este é o primeiro ‘processo’ a atuar face à ocorrência de um evento chuvoso (Amorim *et al.*,2001).

Esta energia, além de promover a desintegração dos agregados naturais do solo, desloca e projeta as partículas finas libertadas a uma distância que, segundo Hillel



Figura 3 - Efeito do impacto das gotas de água no solo e feições erosivas derivadas (pedestais)

estas partículas tendem a preencher os vazios do solo, promovendo a sua compactação, o efeito de *splash* afeta não só a estrutura superficial do solo, como, ao implicar um decréscimo da capacidade de infiltração favorece o escoamento superficial (McCauley e Jones, 2005).

De qualquer modo, a resposta efetiva do solo ao impacto das gotas de chuva, depende do seu teor de humidade inicial, da sua estrutura e textura e da intensidade da precipitação, fatores que condicionam a sua resistência ao cisalhamento (Le Bissonais, 1990). Assim, segundo Al-Durrah e Bradford (1982), o *rainsplash* é mais provável em condições de saturação do solo, em que a força de cisalhamento é menor.

Por outro lado, este processo é também passível de ser associado ao vento, uma vez que a sua velocidade transmite uma força horizontal à gota de chuva promovendo o aumento da sua energia cinética, da qual decorre um acréscimo proporcional da desagregação das partículas do solo (Lyles, 1976; Morgan 1998).

1.2. EROSÃO LAMINAR

Durante um evento chuvoso prolongado ou de precipitação intensa, em que capacidade de infiltração do solo é excedida, começa a desenvolver-se o escoamento superficial laminar difuso¹ (fig. 4), responsável pela erosão em ‘toalha ou manto’ (*sheet erosion*). Forma-se, assim, uma película de água que aumenta de espessura no decorrer do evento, que tende a remover, em finas ‘camadas’, as partículas previamente desagregadas pelo *splash* (Morgan, 1986; Checchia, 2005).

¹ . No ponto seguinte, abordaremos as fontes e componentes dos vários tipos de escoamento, abordando alguns dos modelos propostos para explicar o seu desenvolvimento.

No decorrer do processo o fluxo superficial pode tornar-se turbulento, em função do declive e cobertura solo, mas sempre na dependência da intensidade de precipitação e capacidade de infiltração do solo. Assim sendo, desenvolvem-se forças ascendentes no fluxo onde as partículas mais finas e leves permanecem em suspensão e são transportadas pelo escoamento, enquanto as de maior dimensão são transportadas por saltação ou permanecem na superfície deslizando ou rolando sobre o solo, sob o efeito da força exercida pelo fluxo (Latanzi *et al.*, 1974; Meyer e Armon, 1989; Meyer, 1981; Park *et al.*, 1983; Bradford *et al.*, 1987; Ghidry e Alberts, 1994).



Figura 4 - Exemplo de erosão laminar.

A erosão laminar desgasta a superfície do solo de forma uniforme em toda a sua extensão, desagregando sobretudo partículas de solo que contêm argila e matéria orgânica. Este tipo de erosão é o mais difícil de identificar no terreno, na medida em que não se apresenta sob forma de feição erosiva ativa. Uma das formas de a identificar será através da observação da perda de vegetação, levando ao afloramento dos horizontes mais superficiais do solo, assim como, a exposição das raízes das plantas e a acumulação de detritos finos na base das vertentes ou campos agrícolas, devido ao seu carácter de transporte seletivo.

1.3. EROSÃO EM SULCOS

Em resultado da permanência e acumulação do escoamento superficial, este pode concentrar-se de forma linear em determinados locais, passando a escoar em pequenos canais ou sulcos - habitualmente designados *rills* (fig. 5) - assistindo-se então à remoção do solo em profundidades variáveis (Poesen *et al.*, 2003).



Figura 5 - Erosão por sulcos na Quinta de S. Luiz

Segundo Foster *et al.* (1985) o desenvolvimento da erosão em sulcos (*rill erosion*) está associado à existência de irregularidades na superfície (microtopografia), nas quais o fluxo superficial passa a circular preferencialmente, promovendo o seu progressivo aprofundamento e alargamento. Neste contexto, Moss *et al.* (1982) consideram ainda que para além de existir um percurso descendente principal do fluxo, desenvolvem-se caminhos secundários associados a uma componente lateral, intensificando o movimento das partículas e multiplicando o número de pequenos canais no solo.

Neste sentido, Merritt (1984) considera que a transição para o escoamento em canais obedece a quatro fases, nomeadamente o escoamento superficial não concentrado (laminar ou *sheet wash*), escoamento superficial com caminhos de fluxo concentrado e o desenvolvimento de microcanais sem e com cabeceiras. As maiores diferenças ocorrem sobretudo entre a primeira e segunda fases, verificando-se que a concentração inicial do fluxo dá origem a um sistema de sulcos incipiente. Na segunda fase o fluxo torna-se mais turbulento, pelo que se vão desenvolvendo posteriormente ‘pontos críticos’ de turbulência denominados *rol waves*² (Rauws 1987), que tendem a promover um aprofundamento e alargamento das feições iniciais.

Para Bryan (1987), a transição da erosão laminar para a linear em sulcos agrava de forma clara as taxas de erosão, uma vez que o primeiro processo possui um carácter intermitente influenciado pela energia do impacto das gotas de chuva, mas não assume a importância da concentração do fluxo no transporte de materiais. Com efeito, estudos

² . De acordo com Balmforth e Mandre (2004), estas ondas são distúrbios similares a choques de grande amplitude que se desenvolvem em fluxos de água turbulentos, devido a variações na sua velocidade e profundidade.

desenvolvidos defendem que a dimensão das partículas do solo e a concentração de sedimentos no fluxo são dois fatores preponderantes para o desenvolvimento da erosão em sulcos (Boon e Savat, 1981).

Por outro lado, quando os sulcos se formam vai ocorrendo um recuo da sua cabeceira (*headcut erosion*), o que promove a sua expansão progressiva, dependendo a velocidade desse recuo da coesão do solo, da altura e ângulo da cabeceira e da velocidade do fluxo. Como, de uma forma geral, o impacto das gotas de chuva promove a compactação do solo, a capacidade de transporte do fluxo aumenta proporcionando um maior desprendimento das partículas e concentração de sedimentos.

Govers (1985) defende ainda que esta concentração de sedimentos no fluxo aumenta mais rapidamente com a tensão de cisalhamento que é exercida sobre as paredes laterais dos sulcos. Decorrente disso a erosão torna-se não seletiva, conseguindo o fluxo arrastar tanto as partículas finas como as mais grosseiras. Assim à medida que a concentração do fluxo e a tensão de cisalhamento aumentam, a energia erosiva é capaz de aprofundar os microcanais. Note-se, no entanto, que a formação e concentração de sedimentos nos sulcos não dependem apenas da energia e das partículas transportadas pelo fluxo, mas também do colapso das suas paredes laterais que posteriormente vão evoluindo para formas de maior dimensão.

1.4. EROSÃO EM RAVINAS

Segundo Bull e Kirkby (2002) o termo *gully erosion* ou erosão em ravinas é atribuído ao processo de concentração do escoamento superficial em canais, removendo partículas de solo que promovem o seu progressivo desenvolvimento. Stabile (2013) classifica estes canais ou ravinas como feições alongadas resultantes do escoamento concentrado da água em vertentes, onde atuam processos de remoção de material do seu leito e taludes devido à acção de águas superficiais, considerando que estas feições ocorrem desconectadas da rede de



Figura 6 - Microravina na Qt^a de S. Luiz

feições ocorrem desconectadas da rede de drenagem e podem apresentar dimensões muito diferentes (fig. 6).

Segundo Morgan (1986), a iniciação do processo de ravinamento é bastante complexo, descrevendo a sua formação pelo aprofundamento de canais pré-existentes, nomeadamente dos sulcos (*rills*). Assim, a água proveniente do fluxo superficial acumula-se nos sulcos formando um canal incipiente, nas cabeceiras do qual se concentra a erosão. A continuidade do processo, associada à permanência do escoamento, permite a remoção de partículas da própria vertente e por conseguinte o aprofundamento do canal, bem como o enfraquecimento das paredes da cabeceira, originando o seu colapso e recuo progressivo (fig. 7).

Ou seja, para este autor a principal causa da formação dos *gullies* é o aumento do escoamento superficial, que pode ser ocasionado por eventos de precipitação prolongados e intensos ou pela remoção do coberto vegetal, que ao favorecer o efeito de *splash* tende a compactar os solos e facilitar o desenvolvimento do fluxo superficial. Quando a velocidade do escoamento excede um dado valor crítico ou limiar de resistência do solo, existem condições para o desenvolvimento das ravinas. Estes limiares críticos correspondem, assim, a situações de desequilíbrio que ocorrem quando os parâmetros de força (i.e. turbulência do fluxo superficial) ou resistência (do solo) são alterados.

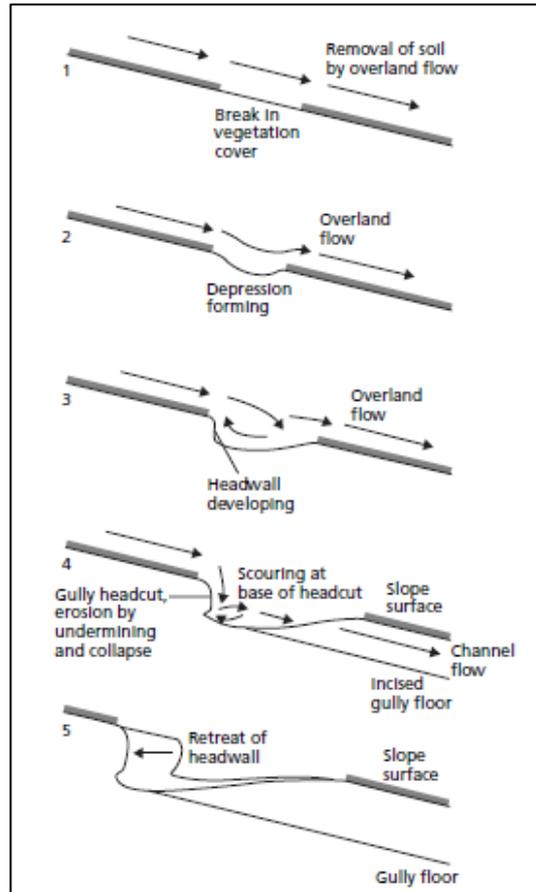


Figura 7 - Fases de desenvolvimento das ravinas. Extraído de Morgan, 1986.

Schumm (1979), por exemplo, explorou a função dos limiares intrínsecos no desenvolvimento das ravinas, tendo em conta a dimensão da área de captação (que controla a descarga) e o declive (que controla a velocidade de escoamento). Considerou que quando numa determinada área o declive excede um valor crítico há tendência para o desenvolvimento de uma incisão no solo, que posteriormente sofre um alargamento e aprofundamento associados à área de captação do escoamento superficial, formando-se então a ravina.

No mesmo sentido, Horton (1945, citado por Stabile, 2013) aborda a definição de limiares críticos para a localização e formação de canais, sugerindo a existência de um ‘cinturão não-erosivo’ nas vertentes, ou seja, uma superfície cuja distância em relação ao topo e o declive não são suficientes para que as forças erosivas possam ultrapassar a resistência do solo (fig. 8).

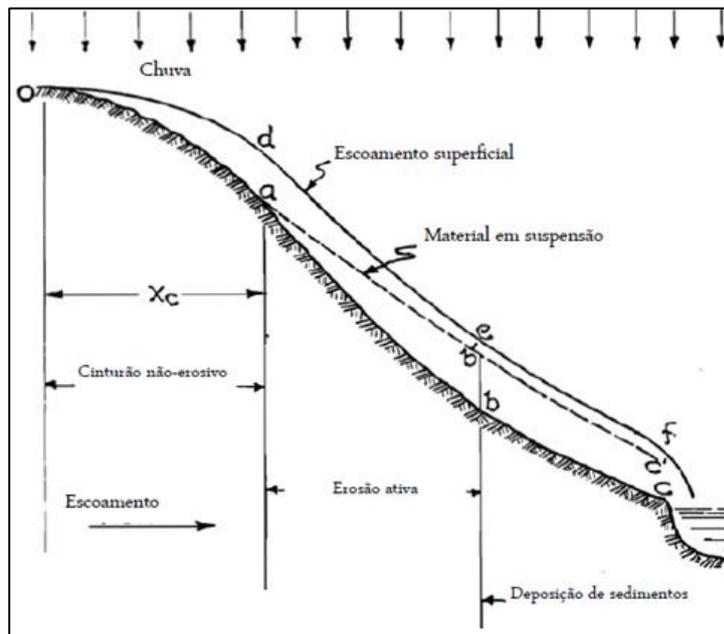


Figura 8 - Figura 8 - Perfil da vertente ilustrando os processos de erosão do solo conforme a descrição de Horton (1945): (abc) representa o perfil da superfície do solo; (odef) representa a superfície de escoamento superficial em manto a partir de um evento de precipitação intensa, com a profundidade do fluxo a aumentar de o para f; (ab'c)' representa o material transportado pelo fluxo. No sector(oa) não ocorre erosão (cinturão não erosivo), uma vez que a energia do escoamento não é suficiente para superar a resistência inicial da superfície do solo à erosão. Extraído de Stabile, 2013.

Também Montgomery e Dietrich (1989; 1994), referindo-se aos limiares geomorfológicos da erosão, consideram que estes são definidos por uma relação entre a área de contribuição, correspondente à cabeceira de um canal, e o declive da vertente a montante. Assim, defendem que o crescimento de canais é mais favorável em áreas topograficamente convergentes situadas a montante das feições erosivas

Para além dos esquemas genéticos sugeridos pelos autores citados, Berry e Ruxton (1960) verificaram, através de um estudo levado a cabo em Hong Kong, que a formação de ravinas pode associar-se ao colapso de túneis (*pipes*). Com efeito, observaram que a maior parte da água precipitada na área em estudo fluía subsuperficialmente em túneis, que sofriam abatimento na sequência de eventos de

precipitação intensa. Este colapso permitia a exposição de uma rede de canais subsuperficiais, que evoluíam para ravinas.

Mas se os mecanismos associados à génese de ravinas são alvo de discussão, também não é fácil apresentar uma definição única de ravina, existindo uma considerável falta de consenso no que se refere à sua caracterização e à própria terminologia utilizada para as designar. Com efeito, de acordo com as suas características morfológicas e os locais onde têm sido estudadas, foram propostas várias tipologias utilizando diferentes critérios de partida, considerando igualmente os objetivos que se pretendem alcançar com o estudo deste tipo de feições (Bergonse e Reis, 2011).

1.4.1. TIPO DE RAVINAS

Uma das classificações mais utilizadas, subdivide as ravinas em efémeras e permanentes (fig. 9), estas últimas por vezes também denominadas ‘clássicas’ (Poesen *et al.*, 1993). Este critério foi introduzido em ligação com o uso agrícola do solo, embora faça também apelo às dimensões que assumem, para distinguir feições que são facilmente eliminadas pelos trabalhos de lavoura ‘normais’ (as primeiras), das que, pelo seu maior tamanho, implicam uma intervenção complexa (Foster, 1986). Efetivamente, de acordo com a *Soil Science Society of America* (1986), as ravinas efémeras correspondem a pequenos canais talhados pelo escoamento superficial concentrado, que podem ser facilmente preenchidos pelos procedimentos da prática agrícola e por eventos de escoamento adicionais. Ao mesmo tipo correspondem, segundo Poesen (1989), as ‘ravinas de fundo de vale’, que se desenvolvem sobretudo em áreas onde o escoamento se concentra devido à ocorrência de eventos de precipitação intensa em áreas relativamente planas.

Classificação similar é expressa por Bull e Kirkby (1997), mas para o conjunto de feições lineares, subdividindo-as em sulcos, canais efémeros e canais permanentes, considerando a sua dinâmica temporal de formação/persistência no terreno e alguns parâmetros morfométricos (i.e. margens evidentes e cabeceiras abruptas no caso das ravinas permanentes). Também Poesen *et al.* (2003) salientam a existência de *rills* (sulcos), *permanent gullies* e *ephemeral gullies*, acrescentando a designação de *bank gullies* para aplicar a feições que se desenvolvem, por recuo de cabeceiras, em taludes de elevado declive.

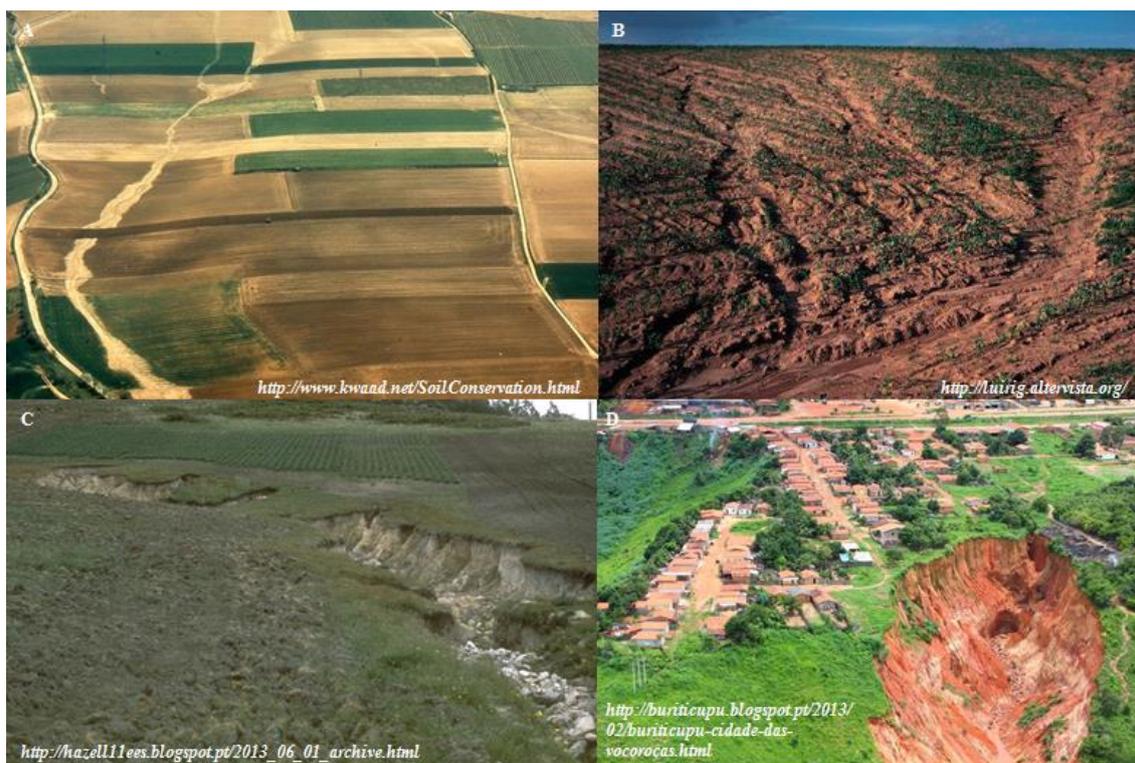


Figura 9 - Tipo de ravinas. A e B, ravinas efémeras; C e D, ravinas permanentes ou clássicas.

Apelando ao contexto topográfico em que se inserem, Bergonse e Reis (2011) optaram por uma diferenciação entre ravinas de fundo de vale (*valley-bottom gullies*), de vertente (*valley-side gullies*) e de desnível (*bank gullies*), que se caracterizam por uma concentração do escoamento em sectores topograficamente condicionados (fig.10).

Assim, por exemplo, as ravinas de vertente formam-se devido à presença de irregularidades na superfície do terreno (i.e. sulcos resultantes da lavra ou do pisoteio do gado), ou associadas a um aumento da erodibilidade do rególito. As ravinas de desnível, segundo referência dos autores citados (Vandekerckhove *et al.*, 2000), estariam associadas a ruturas de declive, que proporcionam uma maior velocidade no escoamento superficial e por conseguinte um aumento no seu poder erosivo. No entanto, o escoamento subsuperficial seria também um potencializador deste tipo de feições, na medida em que o colapso dos tuneis é frequentemente o evento que despoleta a sua formação.

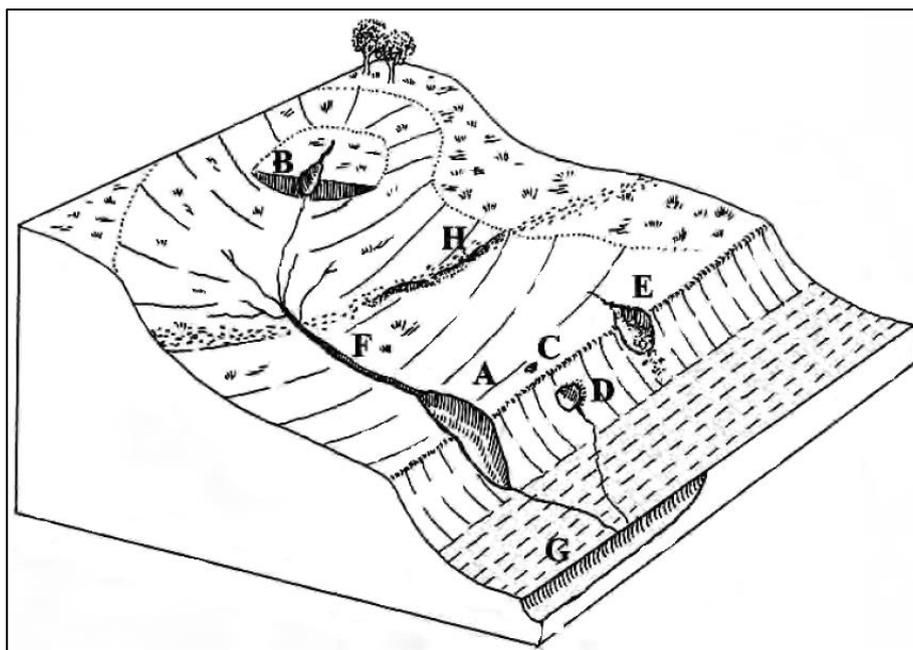


Figura 10 - Contextos topográficos do surgimento de ravinas. A – Ravina de desnível em margem de curso de água; B – Ravina de desnível em terraço; C – Entrada de tubo (pipe); D – Desembocadura de tudo; E – Ravina de desnível formada pelo colapso de um tubo; F – Ravina de fundo tipo arroyo; H – Ravina de vertente associada a um trilho de gado. Extraído de Bergonse e Reis, 2011.

Considerando sobretudo a dimensão das ravinas, apesar de puderem ser associados outros aspetos morfométricos a este critério principal, é possível apresentar outras propostas de classificação.

Vanwalleguem *et al.* (2005), por exemplo, distinguem, no contexto das ravinas efémeras, as que evidenciam um encaixe profundo - *deep gullies* – das que apresentam um desenvolvimento mais superficial – *shallow gullies*. Também Morgan (1986) salienta que estas formas efémeras podem adquirir diversas profundidades, embora considere que geralmente variam entre 25 a 30 cm. Refere ainda que estas feições são essencialmente superficiais e ocorrem quando a força de cisalhamento do escoamento excede a capacidade de resistência do solo, sendo o mecanismo principal do seu desenvolvimento o colapso das paredes da cabeceira. Foster (1982) acrescenta que ao contrário do que acontece nos sulcos, o fluxo superficial é nas ravinas efémeras claramente canalizado, aumentando a sua carga e capacidade de transporte à medida que aumenta o escoamento, através da adição de sedimentos e água produzidos a montante e nas áreas adjacentes. Quando o perfil das ravinas efémeras é côncavo, a capacidade de transporte tende a diminuir proporcionalmente à redução do seu declive, sendo o

comportamento distinto em situações de perfil convexo (fig.11). Com efeito, neste caso o declive tende a diminuir de forma mais acentuada relativamente à carga de sedimentos, o que promove a sua deposição mais rápida.

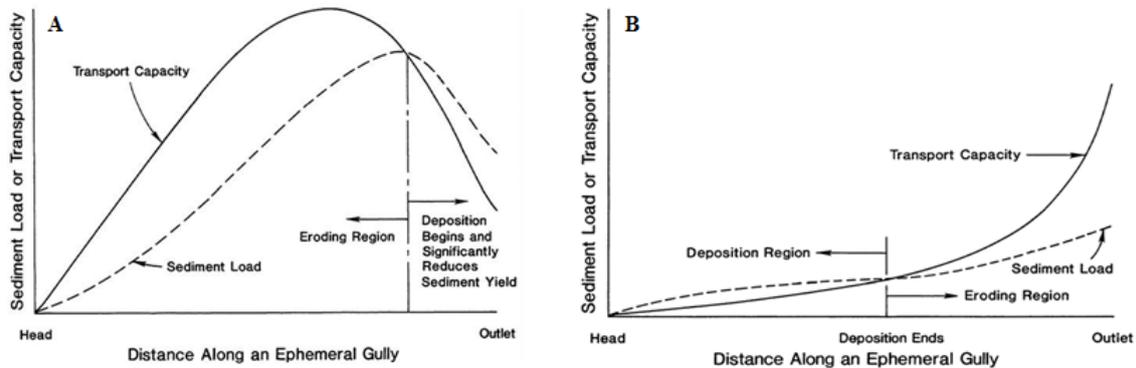


Figura 11 - Variação da carga de sedimentos e capacidade de transporte ao longo de uma ravina efémera com perfil (A) côncavo e (B) convexo (Foster, 1982).

Considerando ainda o critério dimensional, no Brasil é frequente subdividir as feições erosivas lineares em sulcos, ravinas e ‘voçorocas’³, implicando um aumento progressivo do seu tamanho, assim como, no caso das últimas, uma associação frequente a processos de escoamento subsuperficial e ligação com a rede de drenagem (cf. fig...D). Segundo Karmann (2000) as ‘voçorocas’ correspondem normalmente a ravinas permanentes ou clássicas, que se instalam nas vertentes sobre materiais friáveis (mantos de alteração, depósitos ou rochas sedimentares pouco consolidadas), apresentando normalmente um perfil transversal em forma de U com paredes abruptas e fundo plano. A sua dimensão é variável, mas podem atingir uma área superior a 20 hectares e mais de 5 metros de profundidade (Bertoni e Lombardi Neto, 1990).

De acordo com Prieto (2010), estas formas estão com frequência ligadas à expansão dos aglomerados populacionais, sem um planeamento adequado, que contemple um levantamento das características físicas do terreno e o zonamento das áreas mais susceptíveis a estes processos.

A utilização de indicadores morfométricos, que permitem igualmente perceber a dinâmica das formas, é outra das formas de elencar estas feições erosivas. Várias têm sido as propostas apresentadas neste contexto, já expressas e discutidas por diferentes

³. Em Portugal, Rebelo (1982, 2003) adopta uma classificação em parte similar, distinguindo entre ravina e barranco. Considera que a primeira corresponde a uma forma isolada bem definida, que se pode apresentar como elementar ou instalada. Estas últimas, sofrendo um progressivo aprofundamento e alargamento passam a ser denominadas de barrancos.

autores (Poesen e Govers, 1990; Vandekerckhove *et al.*, 1998; Casali *et al.*, 1999; Poesen *et al.*, 2003; Stabile, 2013), pelo que não nos parece relevante foca-las exaustivamente. No entanto, podemos destacar algumas das propostas.

Um dos indicadores mais utilizados é o quociente de largura-profundidade (*Width-depth ratio - WDR*), que Poesen e Govers (*ob.cit.*) referem ilustrar a gravidade do processo de ravinamento, salientando ainda a relação com eventos de precipitação distintos. Por exemplo, consideram que precipitações intensas mas de baixa frequência estão normalmente associadas à formação de ravinas efémeras com um $WDR > 1$, que podem implicar graves danos em terrenos agrícolas, embora estas feições sejam facilmente eliminadas pelos trabalhos de lavoura. Em sentido oposto, feições com um $WDR \leq 1$ parecem relacionar-se com eventos pouco episódios de precipitação pouco intensos mas de elevada frequência, gerando normalmente ravinas profundas que implicam trabalhos de ‘recuperação’ mais pesados, embora as perdas culturais sejam menores.

Importante parece-nos igualmente a proposta de Nachtergaele *et al.* (2002, citado por Poesen *et al.*, 2003, p. 95), que define o domínio dos sulcos, ravinas e pequenos cursos de água, considerando que a largura média das formas (W) parece ser (...) *essentially controlled by peak flow discharge (Q) and the relation between both parameters can be expressed by the equation $W = aQ^b$, with a being a coefficient and the exponent b varying from 0.3 for rills, over 0.4 for (ephemeral) gullies to 0.5 for (small) rivers* (fig.12).

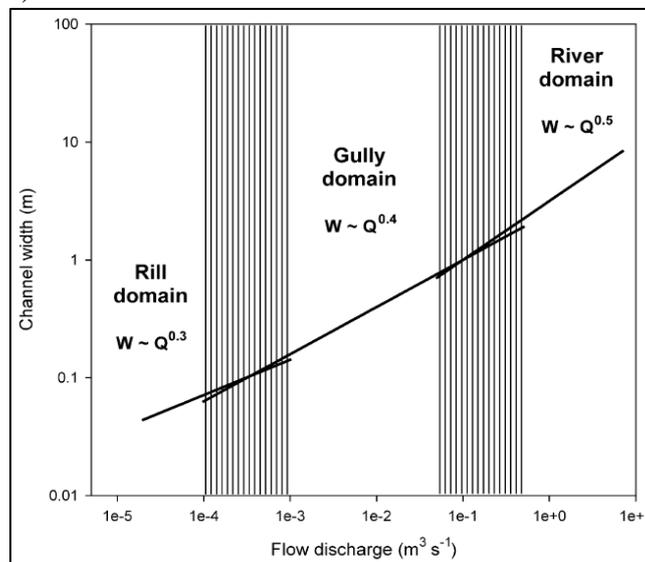


Figura 12 - Relação entre o escoamento concentrado (Q) e a largura média de canais (W) de diferente tipo. Note-se a alteração do expoente b de 0.3 em sulcos (rills) para 0.4 em ravinas (gullies) e 0.5 em cursos de água de pequena dimensão. Extraído de de Poesen *et al.*, 2003.

Salienta-se, por último, indicadores que fazem apelo ao perfil das feições erosivas ou à morfologia que assume o seu traçado em geral ou as suas cabeceiras. Relativamente à forma do perfil e traçado geral das ravinas, normalmente surgem associadas à dinâmica hidrológica responsável pela sua génese. Por exemplo, Sobreira e Bacellar (1999, citado por Stabile, 2013) consideram que feições dendríticas resultam essencialmente do escoamento superficial, enquanto formas circulares parecem relacionar-se com uma dinâmica subsuperficial (*piping*), que tende a evoluir por colapso e posterior evolução muitas vezes condicionada por quedas de blocos.

De forma similar é interpretada a morfologia das cabeceiras de ravinas, tendo ainda em conta o seu estágio de evolução. Oostwoud-Wijdenes *et al.* (1999, p.588) subdividiram as cabeceiras (...) *into four types: gradual, transitional, abrupt and rilled-abrupt*, [considerando que] *gradual types start as small rills and gradually deepen and widen into gullies. Transitional types showed an inclined channel section. The abrupt types included vertical headwalls. When a rill extended upslope from the headcut, it was classified as rilled-abrupt* (fig. 13).

Neste contexto, que apela ao padrão evolutivo das ravinas, salienta-se ainda a proposta de Leopold *et al.* (1964) que referem a existência de ravinas descontínuas e contínuas, considerando que estas últimas são como que uma fase final de (...) *entalhes inicialmente descontínuos ao longo de uma depressão topográfica [que] evoluem para formar um só canal contínuo* (Bergonse e Reis, 2011, p.102).

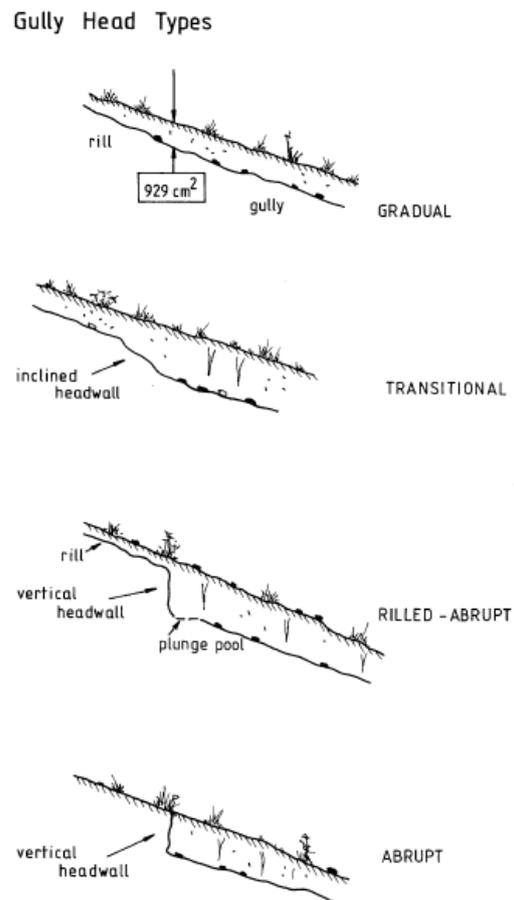


Figura 13 - Perfil longitudinal de vários tipos de cabeceiras de ravinas. Extraído de Oostwoud-Wijdenes *et al.* (1999).

1.5. EROSIÃO EM TÚNEIS

Para além dos processos de erosão superficiais citados, pode ainda considerar-se a erosão em túneis ou canais subsuperficiais (*subsurface pipe erosion*), cuja designação pode ainda englobar os termos ‘sufosão’ ou ‘erosão subcutânea’ (Selby, 1993). Segundo Morgan (1986), este processo associa-se ao movimento lateral da água através do solo (*interflow*), levando ao desenvolvimento de canais subterrâneos cujo colapso pode gerar a formação de ravinas. Segundo Selby (1982), os fatores associados ao desenvolvimento deste tipo de erosão relacionam-se com precipitações sazonais e de grande variabilidade – pelo que são mais frequentes em regiões semi-áridas - solos ricos em argilas expansivas que desenvolvem fissuras de contração em períodos de seca, redução da cobertura vegetal, a existência de camadas relativamente impermeáveis no perfil do solo, ou a atividade de seres vivos que habitam no subsolo. Salientando a importância da textura dos solos, Richley (2000) advoga que a ocorrência da erosão em túneis é usualmente associada a alterações nas condições hidrológicas do solo, que resultam na frequente saturação das argilas.

Este processo pode estar associado ao desenvolvimento de caminhos preferenciais de circulação subsuperficial da água, através dos túneis que se vão formando pela desagregação mecânica e transporte dos materiais (Silva, 2011).

1.6 BREVE SÍNTESE

Vimos que a erosão hídrica de solos engloba vários tipos de subprocessos, dos quais resultam feições específicas. No entanto, como salientamos, nem sempre é consensual a sua definição e classificação. Assim, tendo em conta as considerações teóricas expressas, apresentamos no quadro 1 uma síntese dos subprocessos e formas associadas, contemplando as propostas de vários autores, mas centrando-nos sobretudo em Laflen et al. (1985), Foster (1986) e Poesen et al. (2003).

Quadro 1 -Características dos diferentes subtipos do processo de erosão hídrica do solo. Modificado de Laflent et al. (1985).

Impacto das Gotas de Água	Erosão Laminar	Erosão em Sulcos	Ravinas Efêmeras	Ravinas Permanentes
Ocorre em áreas com declive suave	Ocorre em áreas com declive suave acima das linhas de drenagem	Ocorre em áreas com declive suave acima das linhas de drenagem	Ocorre ao longo das linhas de drenagem rasas a partir da incisão de canais mais profundos que os sulcos	Ocorre em linhas de drenagem bem definidas
Não apresenta uma forma de erosão visivelmente ativa	Pode apresentar dimensões variadas, no entanto menores que os canais de fluxo concentrado	Pode apresentar dimensões variadas, maiores do que os micro-canais e menores que as ravinas	Apresenta dimensões variadas, porém maiores que os sulcos e menores que os barrancos	Apresenta dimensões consideráveis, maiores do que as ravinas.
Desintegração dos agregados do solo e projecção de partículas	Desagregação de partículas transporte pelo impacto das gotas de água e pelo fluxo de escoamento	Remoção de solo pela intensificação do fluxo de escoamento e pelo colapso das paredes dos micro-canais	Remoção de solo em profundidade pela acumulação do fluxo concentrado	Remoção de solo em profundidade pela acumulação do fluxo concentrado ou pelo colapso de pipes
A energia do impacto das gotas de precipitação e a tensão cisalhante do fluxo superficial desagregam as partículas	O padrão de fluxo desenvolve feições em lençol ou micro-canais e paralelos desconectados.	O Padrão do fluxo, com uma componente lateral, desenvolve-se em caminhos secundários	O padrão do fluxo desenvolve um padrão dendrítico	Padrão do fluxo dendrítico ao longo de cursos naturais de água
Não apresenta uma forma de erosão ativa	As secções transversais dos micro-canais normalmente são estreitas em relação à profundidade	As secções transversais dos micro-canais normalmente são estreitas em relação à profundidade	As secções transversais das ravinas são largas relativamente à profundidade, as paredes laterais e a cabeceira não são muito definidas	As secções transversais estreitas relativamente à profundidade, as paredes laterais abruptas e cabeceiras proeminentes
Características temporárias, pela remoção dos processos agrícolas e pelo fluxo superficial	Características temporárias, pela remoção dos processos agrícolas	Características temporárias, pela remoção dos processos agrícolas	Características temporárias, pela remoção dos processos agrícolas	Características permanentes
Taxa de erosão baixa imperceptível visualmente	Taxa de erosão baixa imperceptível visualmente	Taxa de erosão baixa pouco perceptível visualmente	Taxa de erosão perceptível visualmente	Taxa de erosão perceptível visualmente

2. FATORES CONDICIONANTES DA EROÇÃO HÍDRICA

2.1. COMPONENTES, TIPOLOGIA E MODELOS DE PRODUÇÃO DO ESCOAMENTO

No início do ponto anterior, salientamos que a erosão hídrica dos solos resulta da conjugação dos fatores de erosividade e erodibilidade, integrando os primeiros a precipitação e as diversas formas de escoamento, que vão condicionar o tipo de ‘processos’ e a intensidade que assumem (*cf.* fig. 14). Neste contexto, é importante percebermos quais as fontes e componentes do escoamento, considerando que este fator, embora condicionado pela quantidade, duração e intensidade da precipitação e pelas características dos materiais e do terreno, é o principal interveniente do processo erosivo.

Em termos globais, o escoamento total observado numa determinada área, resulta da distribuição da precipitação em quatro componentes principais ou tipos de fluxo (fig.14): o escoamento em canal (*stream flow*), para o qual a precipitação contribui diretamente alimentando cursos de água, lagos e outros reservatórios naturais; o escoamento superficial ou escorrência (*overland flow*), resultado de condicionalismos que inibem a infiltração da água precipitada no solo (i.e. saturação, impermeabilização, hidrofobia, compactação); o escoamento ou fluxo interno ou subsuperficial (*interflow*), que, dependendo da capacidade de infiltração e associado à maior condutividade hidráulica lateral nas camadas superficiais do solo (relativamente à vertical), vai circular internamente de forma mais rápida ou mais lenta (*quick* e *delayed interflow*); o escoamento ou fluxo subterrâneo (*groundwater flow*), que representa o principal componente do escoamento a médio e longo prazo, correspondendo à água que se infiltra até atingir as camadas mais profundas do solo, o que se verifica principalmente quando o solo é profundo e uniformemente permeável.

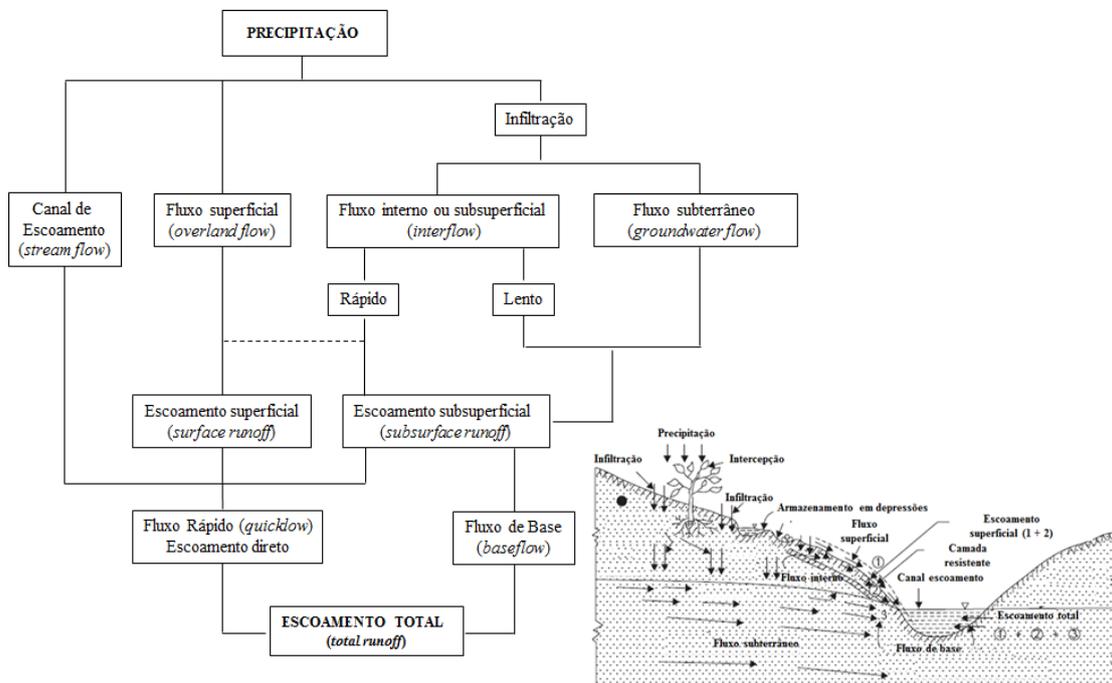


Figura 14 - Componentes do Escoamento. Adaptado de Ward, 1975.

Mas embora esta classificação seja relativamente consensual, existem vários modelos para explicar a produção do escoamento no geral, mas sobretudo da sua componente superficial.

Um dos primeiros modelos foi proposto por Horton (1933). De acordo com este autor o escoamento é condicionado pela intensidade de precipitação e a capacidade de

infiltração do solo, salientando que esta última divide a precipitação em duas partes, seguindo posteriormente diferentes caminhos do ciclo hidrológico: uma parte vai alimentar os rios como escoamento superficial durante os eventos de precipitação (*overland flow*); a outra circula internamente no solo (*interflow*) alimentando posteriormente os cursos de água sob a forma de escoamento subterrâneo, ou retorna para a atmosfera por processos de evaporação⁴. Neste contexto, Horton considera que a produção de escoamento superficial (*overland flow*) resulta fundamentalmente da diminuição progressiva da capacidade de infiltração do solo, na sequência de eventos de precipitação. Ou seja, a partir do momento em que o solo deixa de dar resposta à quantidade de chuva que cai, inicia-se a escorrência⁵ (Kirkby e Chorley, 2010)

No entanto, com base em trabalhos desenvolvidos em áreas florestais onde raramente se observavam fluxos superficiais, Hewlett e Hibbert (1963, 1967) apresentam um modelo alternativo ao anterior. Argumentavam, face à sua experiência de campo, que os solos têm sempre capacidade de infiltração superior à intensidade da maior parte dos eventos de precipitação, pelo que a teoria de Horton não se podia aplicar globalmente para explicar a génese do escoamento superficial. Consideraram, assim, que a maior parte da água da chuva tende a mover-se lateralmente através do solo (fluxo subsuperficial ou *interflow*) para as secções inferiores de uma bacia hidrográfica, acumulando-se até que essa área fica saturada, começando então a água a fluir à superfície. Face à continuidade da precipitação a área saturada vai aumentando, o que vai igualmente promover um acréscimo do percurso do fluxo superficial. Nesta descrição reside o conceito de ‘área de alimentação variável’ (*variable source area*) que caracteriza o modelo de Hewlett e Hibbert (Trimble, 2012).

Este modelo havia já sido em parte idealizado por Betson, (1964), salientando que o escoamento superficial provinha de uma pequena fração das bacias hidrográficas, ou seja de uma área parcial de afluência. Neste sentido, era importante considerar as áreas de contribuição na produção de escoamento superficial.

⁴. *Infiltration divides rainfall into two parts, which thereafter pursue different courses through the hydrologic cycle. One part goes via overland flow and stream channels to the sea as surface runoff; the other goes initially into the soil and thence through ground-water again to the stream or else is returned to the air by evaporative processes. The soil therefore acts as a separating surface and . . . various hydrologic problems are simplified by starting at this surface and pursuing the subsequent course of each part of the rainfall as so divided, separately* (Horton, 1933, citado por Beven, 2004, p.3447)

⁵. *The Horton Model assumes that, for a prolonged storm of constant intensity, a continuous decrease of the infiltration capacity occurs until a constant low value is reached. If, at any time, the infiltration capacity falls below the rainfall intensity, overland flow begins all over the hillslope* (Kirkby e Chorley, 1967, p.6).

Outros autores sugerem modelos para responder à mesma teoria. Dunne e Black (1970), nos Estados Unidos, e ainda Cappus (1960) em França, consideraram que mesmo sob a influência de eventos extremos a água se infiltra nas áreas altas da bacia, deslocando-se subsuperficialmente na vertente, o que vai provocando a saturação do solo (fig.15). Assim sendo, estes autores salientam a importância dos fluxos internos e como estes se comportam sob influência da precipitação.

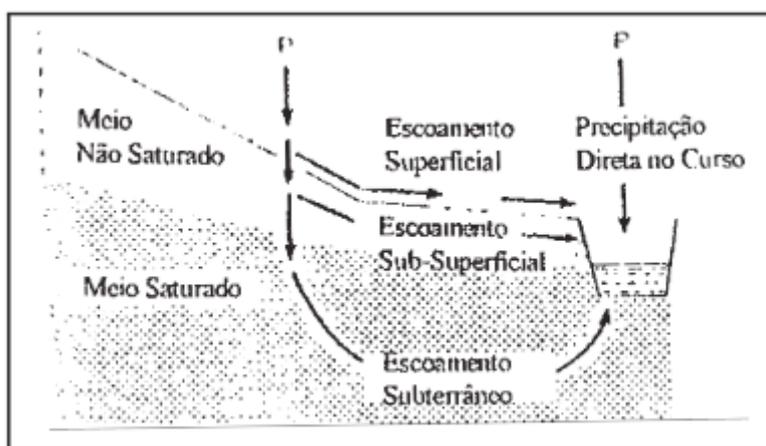


Figura 15 - Visão macroscópica e concentrada dos caminhos preferenciais na geração de escoamento numa vertente (Dunne, 1978). Extraído de Mediondo e Tucci (1997).

Também Santos (2009) considerou o conceito de “área de alimentação variável” (AAV), referindo que a precipitação, o fluxo subsuperficial e a humidade inicial do solo proporcionam a expansão e contração do solo saturado e da rede de drenagem da bacia hidrográfica.

Mediondo e Tucci (1997) explicitam o mecanismo subjacente à AAV, analisando os vários modelos propostos (fig.16), que deve ser analisada de acordo com três premissas: (1) as áreas saturadas atuam como únicas fontes de escoamento rápido, mas absorvem parte da precipitação transformando-a em escoamento subsuperficial lento; (2) estas áreas saturadas situam-se na proximidade dos canais principais (3) as áreas saturadas são alimentadas pelo escoamento subsuperficial produzido a montante pela precipitação incidente.

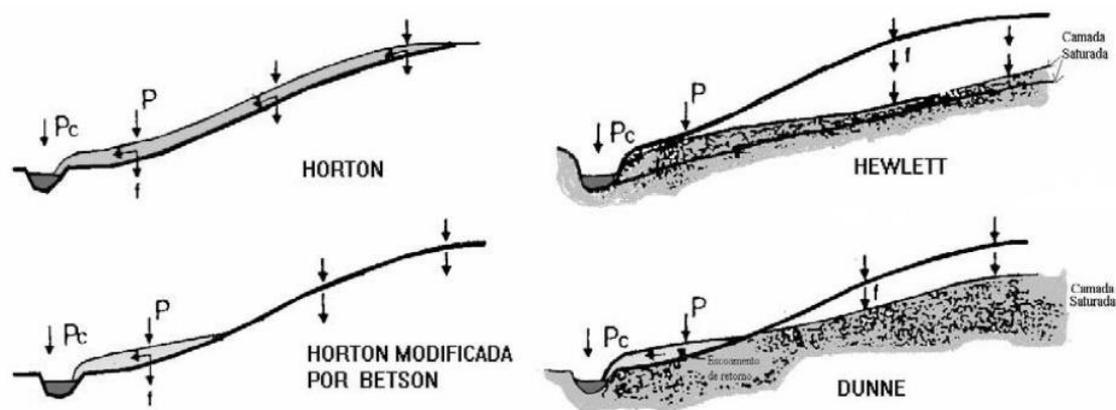


Figura 16 - Principais mecanismos de geração de escoamento. Extraído de Mediondo e Tucci, 1997.

Genericamente, o processo de expansão das áreas saturadas remete ao acréscimo de água no perfil do solo via escoamento subsuperficial, fazendo com que a capacidade de transmissividade do solo seja superada (Siefert e Santos, 2012).

Ward (1994) salienta ainda a ideia de um mecanismo dinâmico que se baseia na intumescência de camadas saturadas, implicando uma sinergia entre canais superficiais e subsuperficiais. As camadas saturadas recebem o escoamento interno através do designado ‘efeito pistão’ e do fluxo da rede de macroporos no sentido vertical e longitudinal da vertente, o que aumenta o gradiente da matriz do solo.

Para Mediondo e Tucci (1997) os caminhos preferenciais relacionam-se com a funcionalidade do sistema das vertentes uma vez que o excesso de água está em constante circulação até à saída da bacia, o que implica infiltração e re-infiltração contínua através de caminhos preferenciais. Aliado a estes sobrevêm outros subprocessos à micro-escala, nomeadamente o fluxo de macroporos, o efeito pistão, o fluxo de retorno e por vezes a intumescência do nível freático.

A importância dada ao fluxo interno, aos caminhos preferenciais e macroporos, extrapolando a ideia que existe uma variabilidade espacial preponderante para definir a heterogeneidade no terreno, torna necessário estabelecer valores médios para a sua caracterização. Ou seja, as características das vertentes e das bacias hidrográficas em geral, apresentam um comportamento não-linear que se vai traduzir em respostas distintas a diferentes *inputs*. Torna-se assim importante, entre outros aspetos, analisar de que forma a morfologia das vertentes condiciona os processos de escoamento.

2.2. CARACTERÍSTICAS DAS VERTENTES

A vertente é a superfície mais instável do relevo, sendo representada pelo seu declive e comprimento, elementos que exercem uma grande influência sobre os processos de erosão (Bertoni e Lombardi Neto, 1999). Deste modo, pode-se afirmar que a erosão é controlada pelo relevo, determinando a sua variabilidade, considerando as diferentes trajetórias que este impõe à circulação dos fluxos de água (Souza, 2001).

Mas não é apenas a morfologia que deve ser considerada neste contexto. Segundo Veloso (2002) quase todas as vertentes se encontram cobertas por formações superficiais, autóctones ou alóctones, constituindo produtos da alteração das *rochas in situ* no primeiro caso, ou materiais que para aí foram transportados no segundo. Estas formações, na perspectiva de Y.

Dewolf (1965, citada por Soares, 2008) devem ser entendidas como o conjunto de materiais móveis ou secundariamente consolidados quer *in situ* quer transportados, que derivam da desagregação mecânica e da alteração química das rochas. O substrato constitui o “esqueleto” sobre o qual assentam, correspondendo as formações autóctones a um substrato origem, enquanto as alóctones resultam de um substrato distinto relativamente ao que presidiu à sua génese (fig. 17).

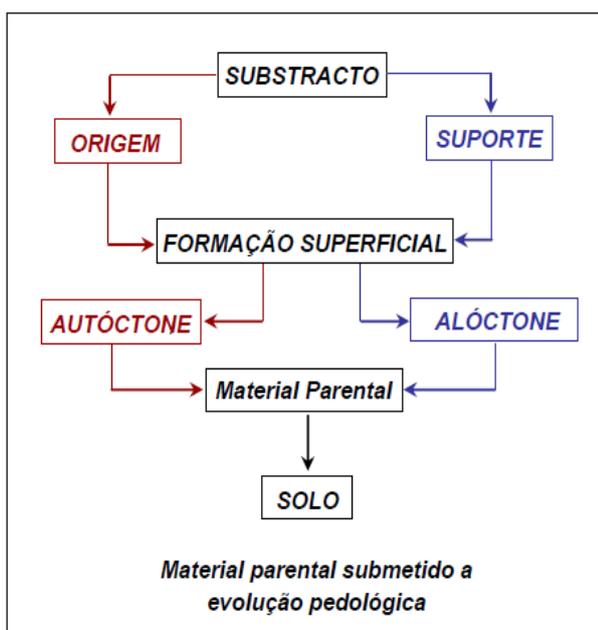


Figura 17 - Relação entre substrato, formação superficial e solo. Extraído de Soares, 2008.

Considera-se, assim, que as vertentes são locais onde ocorre meteorização, transporte e deposição de materiais de acordo com processos diferenciados, em grande parte condicionados pelas características climáticas e contexto morfoestrutural da área em que se inserem (Uhde, 2009). Este contexto é fundamental para compreendermos o comportamento hidrogeomorfológico das vertentes, que vai depender das características das formações superficiais, mas que é igualmente variável em função da sua morfologia,

classificada de acordo com a sua curvatura que pode ser analisada no plano ou em perfil (Anjos, 2008).

Assim sendo o perfil, traçado por uma linha sobre o terreno, caracteriza a morfologia de uma vertente sendo esta expressa pelo ângulo que define a sua inclinação, pelo comprimento e pela sua orientação. De acordo com o valor angular salienta-se que as vertentes com um ângulo constante são consideradas retilíneas, enquanto as vertentes curvas, expressas pelo seu grau de curvatura, se podem apresentar como côncavas ou convexas. Neste sentido, a forma de uma vertente exerce influência sobre os processos erosivos, na medida em que condiciona, associada a outros fatores (i.e. textura e espessura das formações superficiais, tipo e densidade do coberto vegetal), a circulação dos fluxos de água responsáveis pelo transporte de materiais.

As principais conceções teóricas sobre o estudo da forma das vertentes em perfil, defendem a existência de feições básicas, comuns a todas as encostas, independentemente do substrato, clima ou evolução morfológica local. No entanto, estas variáveis atuam diferencialmente no espaço e no tempo, pelo que a morfologia das vertentes resulta de um processo ‘histórico’ de evolução local (Young, 1972).

Hack e Goodlett (1960), estabeleceram uma classificação dos segmentos da vertente baseada em critérios geométricos (fig.18). Assim sendo, a área do interflúvio designada por *nose*, apresenta contornos convexos que configuram a divergência de fluxos; a área entre este segmento convexo e o fundo de vale é designada por vertente lateral (*side slope*), correspondendo basicamente à razão entre a distância horizontal e vertical, definindo o declive que, como referimos, de uma forma básica pode configurar vertentes retilíneas, convexas ou côncavas; a área central ou qualquer outra que adquira contornos côncavos, é definida como reentrâncias ou depressões (*hollow*) onde ocorre a convergência de fluxos e sedimentos, podendo corresponder às cabeceiras de um canal de drenagem⁶; por último a área de sopé (*foot slope*), que se define como a área de transição entre a vertente propriamente dita e o canal fluvial. Desta forma, os autores estabelecem uma relação entre as formas de relevo, a hidrodinâmica da superfície e os processos erosivos (Colangelo, 2011).

⁶ . Segundo Reneau e Dietrich (1990), as concavidades (*hollows*) possuem um baixo gradiente hidráulico o que proporciona, durante a ocorrência de eventos de precipitação, o desenvolvimento de escoamento superficial concentrado.

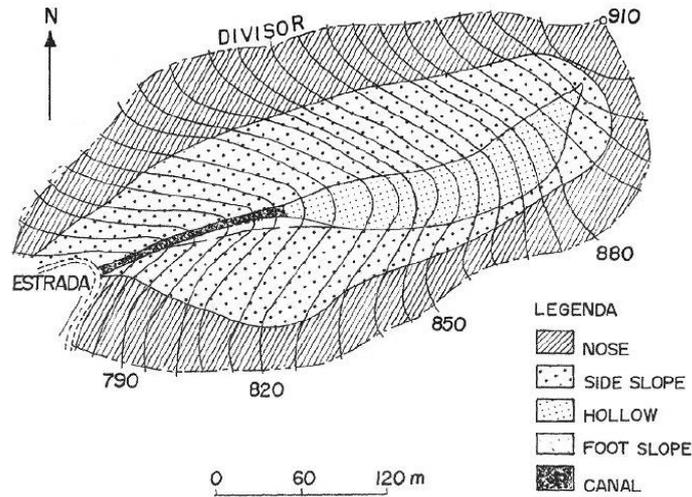


Figura 18 - Topografia de uma cabeceira de drenagem com a representação dos segmentos de encosta propostos por Hack e Goodlett (1960). Extraído de Moura et al.,1991.

Seria Troeh (1964, 1965) a apresentar um dos primeiros estudos que relacionam a morfologia e o comportamento de fluxos superficiais em vertentes, classificando-as em quatro tipos principais com base nos mecanismos de acumulação e deflexão dos fluxos e combinando a sua curvatura no perfil e no plano⁷ (fig.19). Assim, as vertentes com um plano de curvatura convergente funcionam como áreas de acumulação do fluxo (quadrantes I e II), enquanto as de plano divergente provocam a dispersão do fluxo (quadrantes III e IV), definindo a sua curvatura em perfil (declive) o tipo de processos hidrogeomorfológicos que podem assumir maior importância.

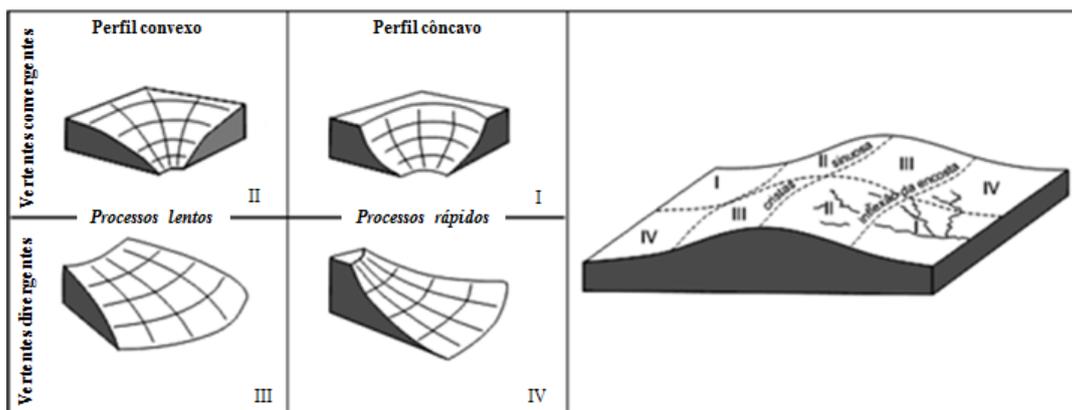


Figura 19 - Classificação de quatro formas de vertentes segundo a curvatura Adaptado de Silveira, 2010.

⁷ .Recorde-se que a curvatura em perfil corresponde à variação do declive na direção da orientação de uma vertente, definindo o seu carácter convexo ou côncavo, aspeto que condiciona a maior ou menor velocidade dos fluxos de água. A curvatura no plano define-se como a variação do declive na direção ortogonal à da orientação da vertente, referindo-se ao carácter divergente ou convergente do terreno. Note-se que nesta classificação são excluídas as vertentes rectilíneas - em perfil – e planares – no plano (Anjos et al., 2011).

O estudo da morfologia de vertentes foi evoluindo, passando da perspectiva bidimensional para a tridimensional. Neste sentido, Hugget (1975) estabelece uma tipologia baseada igualmente na curvatura em perfil e em plano – mas acrescentando agora as variantes retilíneas e planares -propondo nove padrões que se relacionam com a direção dos fluxos na vertente (fig.20).

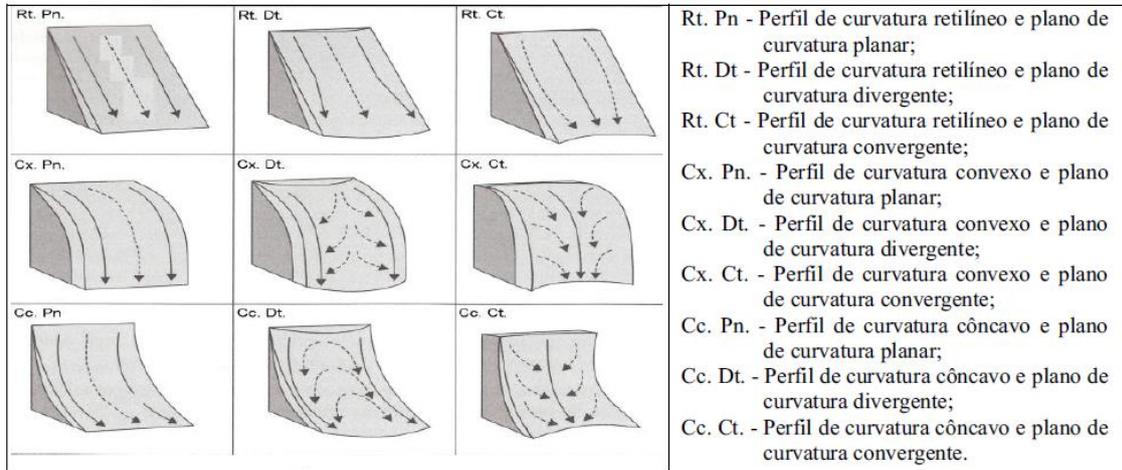


Figura 20 - Fluxo de água no plano de curvatura (setas descontínuas) e no perfil da curvatura da vertente (setas contínuas). Extraído de Silveira, 2010.

Dalrymple *et al.* (1968), por sua vez, desenvolveram um modelo em que compartimentam a vertente em nove unidades associadas a diferentes processos hidrogeomorfológicos (fig.21). Como se pode observar, combinam a curvatura em perfil e no plano, embora Vidal Torrado *et al.* (2005), acrescentem a estes parâmetros a espessura das formações superficiais/solo. Com efeito, referem que os processos que ocorrem principalmente nos 4 primeiros segmentos, são também condicionados pela espessura dos materiais que recobrem a vertente.

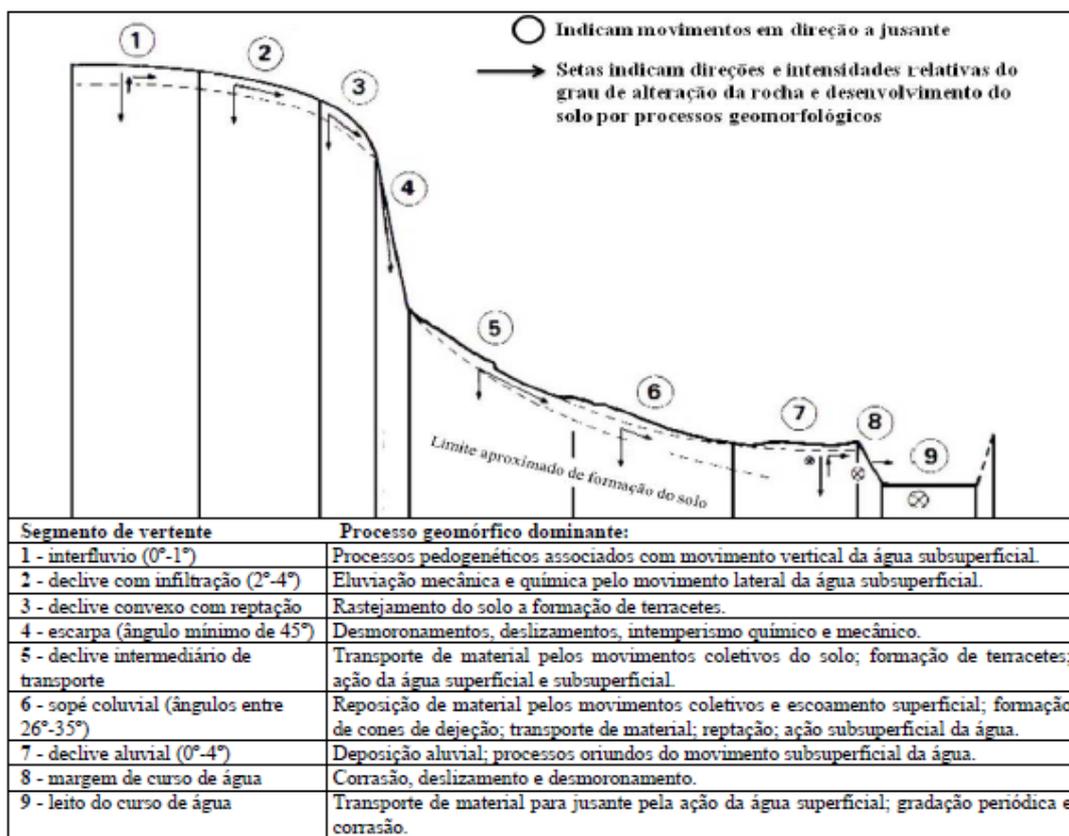


Figura 21 - Nove unidades hipotéticas do modelo de segmentos de vertentes. Extraído de Silveira, 2005.

Assim, de acordo com a figura, o segmento (1) é o que apresenta menor taxas de erosão, também por ser o mais profundo. Por outro lado é no segmento (3) que a erosão é mais exacerbada, uma vez que não se verifica a acumulação de sedimentos. É no segmento (4) que surgem ruturas de declividade, em muito influenciadas pela sua composição ser caracterizada pela existência de rocha consolidada. No segmento (5) proporciona a formação de uma área de acumulação de sedimentos que se caracteriza pelo segmento (6). Por fim surgem áreas de planície onde deposição aluvial e, por consequência ocasionam a saturação hídrica, segmento (7).

Baseado nos estudo teóricos, dos autores elencados anteriormente, Colangelo (1989; 1996) desenvolve o modelo de feições mínimas ou elementares do relevo. Assim, aplica uma combinação das formas elementares de relevo em planta e perfil, definindo nove variações (fig.22).

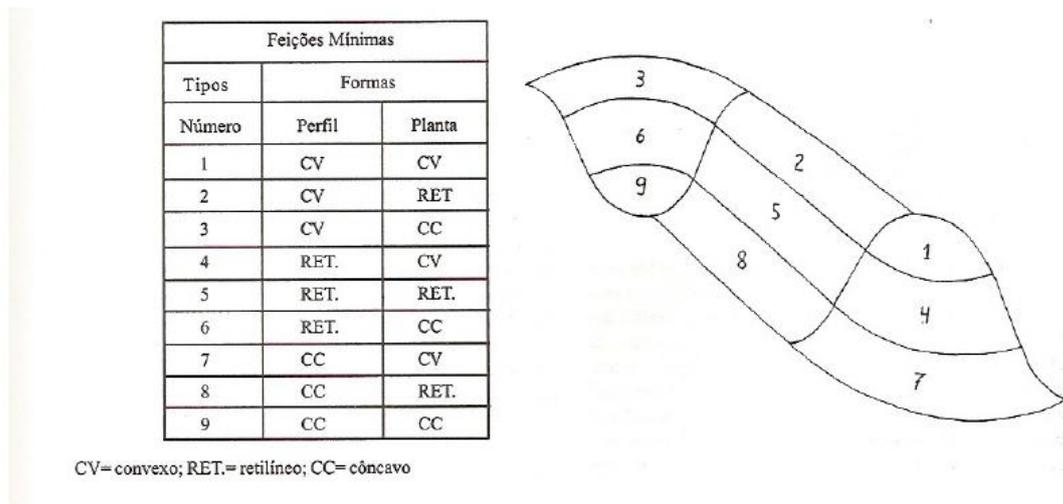


Figura 22 - Unidade ideal do relevo e as suas componentes elementares (Colangelo, 2011).

O autor considera que o fluxo superficial, ao longo do tempo geológico, influenciou a formação das várias formas de relevo, compostas por frentes de interflúvio - *noses* (1,2,3,4 e 5) - e anfiteatros - *hollows* (6, 7, 8 e 9).

Para além desta combinação, Colangelo (2011) associa as formas elementares à hidrologia de superfícies, considerando que a dinâmica do fluxo hídrico superficial é controlada por dois fatores. O primeiro condiciona a energia cinética que é transferida ao fluxo, referindo-se assim, à ação da componente lateral da força gravitacional, que é controlada pelo declive do terreno. O segundo é responsável pelo padrão do escoamento, através da geometria do terreno, definindo assim as linhas do fluxo. Segundo Colangelo (2011) os padrões do escoamento superficial podem ser descritos em função do carácter de dispersão ou concentração, para além que são controlados pela geometria do terreno.

Assim, as formas de relevo côncavas e convexas condicionam os padrões de dispersão e concentração de drenagem, e por conseguinte as formas que se assumem retilíneas são consideradas neutras no que respeita ao fluxo hídrico.

Portanto, as formas convexas, quando observadas em planta, vão condicionar as linhas do fluxo, uma vez que a superfície de escoamento superficial aumenta para jusante forma assim uma dispersão de fluxos denominada, também, por dispersão radial.

Por outro lado, a convexidade observada em perfil proporciona outra componente da dispersão, desta feita associada à energia dos fluxos.

Neste sentido, a declividade do perfil, das vertentes convexas, aumenta para jusante a componente lateral da força da gravidade também acresce e por isso, acelera o fluxo superficial.

Considera-se assim, que as vertentes convexas retêm menos água à superfície, o que significa haverá uma menor quantidade de fluxo para a percolação de água no solo e consequentemente alimentação dos aquíferos.

Em seguimento da relação entre as formas do relevo e a hidrodinâmica Colangelo (*ob cit.*), associou a cada uma das nove formas de relevo um padrão específico de escoamento superficial. Assim, compartimentou-as em dois níveis taxonómicos, sendo que o primeiro corresponde ao domínio hidrodinâmico, a que pertence um dado padrão, e o segundo especifica o tipo dentro do domínio.

Ao nível do domínio hidrodinâmico associam-se mais três domínios, a designar o domínio de dispersão, no qual estão incluídos fluxos hiperdispersores, mesodispersores, longitudinais, hipodispersores e mesodispersores radiais, respetivamente associados às formas elementares do tipo 1, 2, 3, e 4.

De outro modo surge o domínio de transição ou de neutralidade relacionado com a forma elementar 5 e com o fluxo neutro.

Por fim, surge o domínio de concentração que inclui os fluxos mesoconcentradores radiais e longitudinais, hipoconcentradores e hiperconcentradores que correspondem às formas 6, 7, 8 e 9. (fig. 23).

FM	Perfil	Planta	Fluxo Resultante	Domínio
1	CV	CV	Hiperdispersor	Dispersão
2	CV	r	Mesodisp. Longitudinal	
3	CV	CC	Hipodispersor	
4	r	CV	Mesodisp. Radial	
5	r	r	Transição (Neuro)	Transição
6	r	CC	Mesoconc. Radial	Concentração
7	CC	CV	Hipoconcentrador	
8	CC	r	Mesoc. Longitudinal	
9	CC	CC	Hiperconcentrador	

CV= convexo; r.= retilíneo; CC= côncavo

Figura 23 - Classificação dos fluxos hídricos superficiais. (Colangelo, 2011).

Desta forma, percebe-se que o estudo da geometria das vertentes é importante na determinação das áreas mais suscetíveis à erosão: nas vertentes côncavas existe uma maior concentração de fluxos associada a uma elevada taxa de infiltração e uma fraca capacidade de escoamento superficial. Por outro lado, nas vertentes convexas verifica-se uma dispersão de fluxos e materiais superficiais, que se correlaciona com uma infiltração diminuta que proporciona um elevado escoamento superficial e consequente remoção de sedimentos mais avultada. A geometria vertical retilínea age de modo a atenuar os processos de dispersão ou acumulação extremos (hiperdispersor ou hiperconcentrador), sendo tais aspetos relevantes frente à dinâmica de evolução das vertentes e do seu respetivo grau de instabilidade potencial.

3. MODELOS APLICADOS AO ESTUDO DA EROSÃO HÍDRICA DE SOLOS

Segundo Merrit *et al.* (2003), a erosão hídrica do solo é um processo de difícil modelação na medida em que requer uma parametrização bastante detalhada dos fatores envolvidos, revelando por vezes um carácter não linear que depende igualmente da escala de análise.

Revelando a importância e a variabilidade dos objetivos que assistem o estudo da temática em causa, é possível identificar, através de uma cuidada revisão bibliográfica, mais de 80 modelos que incorporam processos erosivos na sua estrutura, seja como módulo independente, seja como parte intrínseca de modelos modificados (Lilly *et al.*, 2009; Karydas *et al.*, 2012). Estes modelos distinguem-se sobretudo pelo seu nível de complexidade, pelos processos que consideram e como são representados e pelos dados de *input* e calibração necessários.

A escolha do modelo mais adequado irá depender dos objetivos da sua aplicação e dos resultados que se pretende obter, considerando ainda as características da área em estudo, a escala de análise espacial e temporal, a precisão e validação do modelo, bem como os requisitos de *hardware*⁸.

⁸. Ilustrando esta questão, Merrit *et al.* (*ob.cit.* p.791-792) salientam que dado o elevado número de modelos disponíveis, a selecção do mais adequado (...) *is the question(s) that the model user is attempting to address*. Referem, ainda, que a definição clara do(s) objetivo(s) que se pretende(m) atingir permite identificar (...) *those processes that require explicit representation in the model, as well as the spatial and temporal resolution at which a model needs to be applied*. *From here, determining the appropriate model for an application requires consideration of the suitability of the model to local catchment conditions, data requirements, model complexity, the accuracy and validity of the model,*

Neste contexto, observa-se que a tipologia dos modelos de erosão, assim como acontece na classificação de outro tipo de processos, vai depender do(s) critério(s) considerados, tal como discutiremos seguidamente.

3.1. TIPOS DE MODELOS

No âmbito da erosão do solo e em termos estruturais – dependendo dos processos físicos simulados, dos algoritmos que descrevem esses processos e dos dados necessários – vários autores salientam que podem ser considerados 3 tipos principais de modelos: empíricos, conceptuais e fisicamente baseados (Nearing, et al., 1994; Merrit *et al.*, 2003; Vente e Poesen, 2005). No entanto, as diferenças entre estes modelos nem sempre são nítidas e cada vez mais se assiste à utilização de modelos que incorporam uma mistura de procedimentos, pelo que a sua tipologia é por vezes subjectiva assumindo diferenças consoante os autores.

Morgan (1986), por exemplo, distingue três tipos de modelos - empíricos, estocásticos e fisicamente baseados – a que associa algumas características principais (quadro 2). No entanto, o termo ‘estocástico’ é normalmente aplicado em contraponto aos designados modelos determinísticos, isto é, modelos que utilizam (...) *mathematical functions that ignore random variations in system parameters and state variables, hence for a given set of inputs, the outputs will always be the same*⁹. Assim sendo, talvez a designação de ‘conceitual’ seja mais adequada.

Quadro 2 - Tipos de modelos de erosão segundo Morgan1986. Adaptado de Tomás (1993).

Tipos de Modelos	Descrição
<i>Empíricos</i>	Baseado na identificação das relações estatísticas mais significativas entre as variáveis mais importantes, a partir de bases de dados de boa dimensão e qualidade. Ou seja, estes modelos recorrem à representação simplificada dos processos com base em resultados obtidos experimentalmente, pelo que normalmente se aplicam apenas às áreas usadas para derivar a informação.
<i>Estocásticos</i>	Baseiam-se na geração de séries sintéticas de dados a partir de características estatísticas de dados existentes. São geralmente usados para gerar séries para servirem como valores de entrada em modelos empíricos e fisicamente baseados, quando se dispõe de observações para períodos de tempos curtos. Ou seja, alguns dos inputs e parâmetros são representados por distribuições estatísticas e não por valores únicos, podendo representar uma média ou desvio padrão. Assim, são modelos probabilísticos destinados a lidar com eventos de carácter aleatório.
<i>Fisicamente baseados</i>	Baseados em equações matemáticas que descrevem os mecanismos fundamentais do processo erosivo, considerando os princípios de conservação da massa e da energia. São geralmente de carácter determinístico, exigindo informação de base com elevada resolução espacial e temporal.

model assumptions, the spatial and temporal variation, components of the model and the objectives of the model user(s).

⁹. In: <http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/nps/reports/npsch3.pdf>. Acedido em 02-05-2014

Furegatti (2012) apresentou igualmente uma sistematização tipológica dos modelos que simulam processos erosivos, embora mais exaustiva, subdividindo-os em sete categorias: conceituais, fundamentados em processos, de base física, empíricos ou de regressão, semi-quantitativos, de avaliação global de degradação do solo e de evolução do relevo (*landform*). Considerou, ainda, que os modelos fisicamente baseados podiam ser divididos em três sub-tipos, nomeadamente com base num evento de chuva, com base na continuidade da chuva e espacialmente distribuídos.

Considerando o critério escala temporal, Boardman também (2007) salienta a diferença entre modelos orientados para avaliar os efeitos associados a eventos específicos (*event based models*, como o LISEM - *Limburg Soil Erosion Model* - ou o ANSWERS - *Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*), dos utilizados para analisar consequências a mais longo prazo (*averaged daily/monthly/annual/long term*), designadamente alterações no uso do solo ou a variabilidade climática (i.e. USLE – *Universal Soil Loss Equation* ou o WSM - *Wallingford Scoring Model*). Da mesma forma, em termos espaciais, há modelos desenvolvidos para aplicação em áreas de dimensão diferenciada (i.e. à escala de bacias e sub-bacias hidrográficas, parcelas experimentais, vertente), assim como os que incorporam parâmetros uniformes ou espacialmente homogéneos - *lumped models* (i.e. EPIC, *Erosion-productivity Impact Calculator Model*) - dos que reflectem a sua variabilidade espacial - *distributed models* (i.e. SWAT, *Soil and Water Assessment Tool*) – considerando-se ainda modelos semi-distribuídos (Jetten *et al.*, 2001).

Para além destes vários aspetos ou critérios de classificação, os modelos de erosão podem ainda ser aplicados para avaliar processos e feições erosivas específicas, assim como envolver fatores de erosividade e erodibilidade diferenciados em função dos objetivos e resultados que se pretendem atingir (Hasholt, 2002). Como referem Vente e Poesen (2005, p. 96) grande parte dos modelos (...) *are reductionistic and focus on a limited number of soil erosion and sediment transport processes. Most models focus on rill and interrill erosion and some models specifically on gully and bank erosion.*

Assim, como salientam Karydas *et al.* (2012, p.1), a classificação dos modelos tem de considerar vários aspetos (...) *with regard to several erosion parameters, such as extent and duration of implementation, influencing factors, processes taking into account, features to be assessed, forms of hazard, type of algorithm and type of assessment* (figura 24).

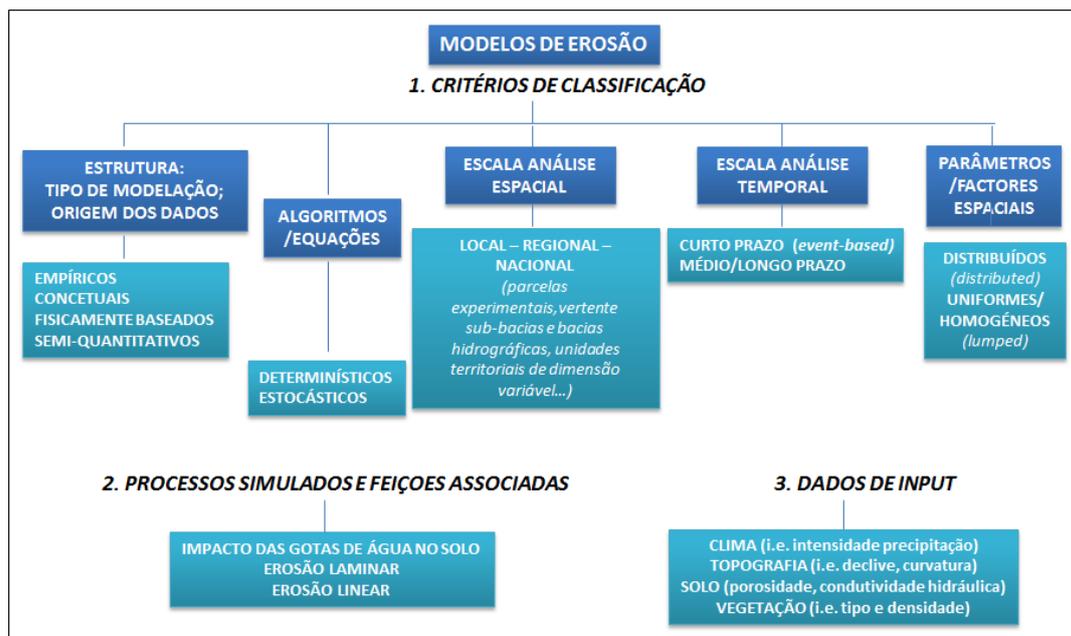


Figura 24 - Critérios de classificação dos modelos, processos contemplados e principais dados de input.

Para uma melhor compreensão da temática alvo da presente dissertação, vamos proceder a uma breve caracterização dos modelos¹⁰ que integram processos erosivos, considerando sobretudo os aspetos estruturais em que assenta a modelação.

3.1.1. MODELOS EMPÍRICOS

Considerados de mais fácil aplicação, os modelos empíricos baseiam-se principalmente na obtenção de dados a partir de ensaios laboratoriais e *in situ*, sendo uma das suas características principais o elevado grau de agregação das variáveis temporais e espaciais e a incorporação reduzida de variáveis causais (Wheater *et al.*, 1993). Ou seja, baseiam-se geralmente em heurísticas simplificadas que se apoiam na resposta conhecida do sistema em estudo, procurando-se prever o seu comportamento partindo de diversas observações e experiências. Assim, estes modelos recorrem à representação simplificada dos processos com base em resultados obtidos experimentalmente, pelo que normalmente se aplicam apenas às áreas usadas para derivar a informação (quadro i, em anexo).

Esta limitação, de acordo com Furegatti (2012), prende-se com o fato da modelação pressupor que as variáveis de *input* permanecem inalteradas no período em estudo – definindo um sistema estacionário – pelo que o potencial de predição associado

¹⁰ . Em anexo apresentamos as características sumárias dos principais modelos de erosão.

a eventuais alterações é igualmente restringido. Acresce ainda o problema de por vezes não ser considerada a variabilidade espacial dos fatores de erosividade e erodibilidade.

Por outro lado, o cálculo das variáveis aplicadas no modelo, não possuem, frequentemente, uma associação às leis físicas que determinam o fenómeno em estudo. Como referem Nearing, Lane e Lopes (1994), constituem sobretudo representações simplificadas dos processos naturais, baseando-se em observações empíricas, sendo por isso também designados por modelos de ‘caixa negra’ (*black-box models*), de *input-output* ou de regressão, uma vez que estabelecem relações entre as ‘entradas e saídas’ do sistema sem qualquer preocupação em descrever o comportamento de processos específicos.

Assim sendo, este tipo de modelos revela-se pouco satisfatório no que se refere ao conhecimento mais detalhado dos processos de erosão hídrica e das feições erosivas resultantes, aplicando-se geralmente para calcular a erosão média anual provocada por processos laminares e lineares (*sheet/interrill and rill erosion*). Mas apesar das limitações expressas, os modelos empíricos fornecem resultados satisfatórios em algumas situações, pelo que são uma ferramenta útil à tomada de decisões. Merrit *et al.* (2003, p. 768) salientam que ao incorporarem um pequeno número de variáveis e ignorando a sua heterogeneidade no contexto das áreas em estudo, (...) *they can be implemented in situations with limited data and parameter inputs, and are particularly useful as a first step in identifying sources of sediment and nutrient generation (...) particularly at the regional scale*.

No contexto destes modelos, salienta-se a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) - ou, no original mais conhecido *Universal Soil Loss Equation* (USLE) - e as suas sucessivas reformulações (i.e. *Modified Uiversal Soil Loss Equation* – MUSLE; *Revised Universal Soil Loss Equation* – RUSLE), constituindo um dos modelos empíricos mais conhecidos e aplicados, que tem inclusivamente servido de base à definição de outros modelos do mesmo tipo (Wischmeier e Smith, 1978; Renard, *et al.*, 1991). Aliás, alguns dos modelos derivados correspondem unicamente a uma adaptação dos parâmetros às características específicas das áreas em estudo, como é o caso do SOILOSS (*Australian Soil Loss Programme*), ou na (re)definição das equações utilizadas no cálculos dos fatores de erosão (principalmente do topográfico LS – *length/slope*). Salienta-se ainda, no sentido de incorporar variabilidade espacial ao nível

dos parâmetros tradicionalmente ‘homogêneos’ da USLE, o modelo SEDD (*Sediment Delivery Distributed*) desenvolvido por Ferro e Porto (2000).

3.1.2. MODELOS CONCEPTUAIS

Os modelos conceptuais, por vezes designados como modelos de ‘caixa-cinzenta’ (*grey-box models*), são normalmente uma mistura entre os empíricos e os fisicamente baseados, aplicando-se essencialmente para responder a questões gerais (Beck, 1987).

De acordo com Merrit *et al.* (2003), incorporam descrições sumárias dos processos à escala da bacia hidrográfica – designadamente mecanismos de transporte de sedimentos associados à produção de escoamento - sem especificar as suas interações, uma vez que tal implicaria informações de detalhe. Assim, consideram princípios físicos, mas de uma forma simplificada.

Assim, este tipo de modelos proporciona uma avaliação qualitativa e quantitativa dos processos erosivos, sem envolver uma grande quantidade de dados espacial e temporalmente distribuídos, normalmente determinados por calibração baseada em séries de dados disponíveis ou obtidos de forma empírica (Kleissen *et al.* 1990; Wheeler *et al.*, 1993).

O quadro ii, em anexo, apresenta os principais modelos conceptuais e algumas das suas características. A maior parte destes modelos é aplicado à escala da bacia e, ao contrário dos empíricos, contempla normalmente uma escala temporal de mais curto prazo, designadamente ao nível de eventos específicos. Dos modelos que integram esta tipologia pode destacar-se o AGNPS (*Agricultural NonPoint Source Pollution*), originalmente desenvolvido (...) *to predict and analyse the water quality of runoff from rural catchments ranging from a few to over 20 000 hectares* (Merrit *et al.*, 2003, p.775). No entanto, também permite avaliar a erosão e transporte de sedimentos – envolvendo o cálculo de componentes hidrológicas e de mobilização de sedimentos e nutrientes - utilizando a formulação da USLE ou a RUSLE neste domínio (Leon e George, 2011). Assim, embora de base conceptual este modelo incorpora aspetos empíricos, indo de encontro ao que inicialmente referimos sobre as dificuldades associadas à classificação dos modelos, que cada vez mais recorrem a uma mistura de procedimentos¹¹.

¹¹ . Sobre este assunto, Furegatti (2012, p.62) salienta: *A distinção entre os modelos não é exata e pode ser subjetiva. Existem modelos compostos por vários módulos e, portanto, podem conter uma mistura de [cada uma das tipologias] Um modelo pode ser, por exemplo, conceptual em sua estrutura, mas possuir processos descritos por algoritmos empíricos e/ou com base física.*

3.1.3. MODELOS DE BASE FÍSICA

Estes modelos são concebidos a partir do entendimento dos processos físicos do fenómeno alvo da modelação, sendo também designados modelos de ‘caixa branca’ (*white-box models*) porque implicam uma clara compreensão causa-efeito.

Geralmente são de carácter determinístico¹², representando os processos físicos observados no mundo real e recorrendo a princípios da mecânica de fluidos, da hidráulica e de outras ciências e tecnologias do campo da Física, da Meteorologia, da Hidrologia ou de outros domínios afins (Bennett, 1974). Normalmente caracterizam-se por descreverem os processos que atuam num dado sistema e a relação entre parâmetros através de funções matemáticas (do escoamento superficial, escoamento sub-superficial, evapotranspiração e escoamento em superfície livre, mas podem ser muito mais complexos, incluindo aspetos relacionados com a qualidade da água, os usos da água e as questões económicas com eles associadas, nomeadamente em matéria de regadio, armazenamento de água, aproveitamentos hidroelétricos, navegação em canais e rios e gestão de cheias e descargas), ignorando variações aleatórias, pelo que para um conjunto de *inputs* os *outputs* serão sempre os mesmos.

Exigem informação de base de elevada resolução espacial e temporal e são utilizados para aplicações específicas. Normalmente são capazes de explicar a variabilidade espacial das características mais importantes de uma área, como a topografia, declive, exposição, vegetação, solo.

Nos quadros (iii, iv, v e vi, em anexo) apresentamos os modelos de base física referidos na vasta bibliografia consultada. Não sendo nosso objetivo fazer uma descrição exaustiva das suas características, até porque vários autores já se debruçaram sobre esta questão, salienta-se o facto de termos considerado a sua subdivisão em função da escala temporal de análise (análise temporal definida *versus* físicos contínuos) e de incorporarem ou não parâmetros espacialmente distribuídos ou homogéneos.

No contexto dos primeiros destaca-se um número considerável dos que visam modelar a erosão face a eventos específicos, como o GUEST (*Griffith University Erosion System Template*), o LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*) ou o WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*), aspeto interessante que permite, por

¹². Refira-se, de acordo com Vogel (1999), que os modelos determinísticos não são, necessariamente, de base física. Com efeito, incluem por vezes elementos empíricos e concetuais de forma a incorporar características específicas das áreas em estudo e reproduzir aspectos gerais dos processos modelados.

exemplo, fazer simulações utilizando valores de precipitação de episódios conhecidos e responsáveis por danos nas áreas em estudo. Esta simulação, por sua vez, poderá ajudar a definir limiares críticos de precipitação, a partir dos quais será possível estabelecer situações de alerta.

Mas independentemente deste aspeto, parece-nos importante referir que a maior parte destes modelos são aplicados, em termos espaciais, a bacias hidrográficas de dimensão variável, aspeto metodológico que revela um certo ‘afastamento’ dos estudos de erosão relacionados com a evolução de vertentes, incluindo no seu desenho experimental parcelas amostra, metodologia empírica muito aplicada no contexto dos tempos áureos da geomorfologia quantitativa (Young, 1960) e no contexto de estudos cujo objetivo era sobretudo avaliar a erosão pós-incêndio (Sala Sanjaume *et al*, 1991; Coelho *et al*, 1995).

Por outro lado, muitos destes modelos têm uma base hidrológica, o que também justifica o contexto espacial definido - como é o caso do CASC2D-SED (desenvolvido para determinar o hidrograma de escoamento gerado a partir de um evento de precipitação) ou do HEC-HMS (que incorpora vários procedimentos tradicionais da análise hidrológica) – mas normalmente incluem módulos específicos orientados para o cálculo da erosão. Aliás, uma das características destes modelos prende-se precisamente com a complexidade dos cálculos que implicam, já que a sua base teórica assenta num entendimento dos processos físicos que simulam.

Outro aspeto importante, prende-se com o tipo de processos/feições erosivas a que os modelos se aplicam. Embora alguns refiram explicitamente a sua adequabilidade aos processos laminares e lineares – como o CONCEPTS (*Conservational Channel Erosion and Pollutant Transport System*) – outros excluem, por exemplo, a formação de barrancos (*gullies*) – como o KINEROS (*Kinematic Erosion Simulation*) ou o PERFECT (*Productivity Erosion Runoff Functions to Evaluate Conservation Techniques*), excluindo também este último a erosão por sulcos. Assim, na escolha do modelo a aplicar, este é sem dúvida um aspeto a considerar, tendo em conta as características das feições dominantes na área em estudo.

3.1.4. MODELOS SEMI-QUANTITATIVOS

Incorporando métodos estatísticos e utilizando frequentemente a atribuição de *scores* aos fatores condicionantes da erosão, este tipo de modelos (quadro vii, em anexo) combina procedimentos descritivos e quantitativos para caracterizar uma bacia de drenagem, resultando numa estimativa quantitativa ou, por vezes, qualitativa da produção de sedimentos (De Vente e Poesen, 2005; Yura, 2010).

Pode-se dizer que os modelos semi-quantitativos são modelos de regressão, mas existem diferenças entre eles. Assim, os modelos de regressão mais tradicionais consideram apenas um fator, como por exemplo a área da bacia, ou até mesmo uma relação entre os diversos fatores. Ao simplificarem demasiado a realidade, permitem explicar apenas uma pequena parte na variação da produção de sedimentos (Verstraeten *et al.*, 2003). Os modelos semi-quantitativos de múltiplas variáveis utilizam diversos fatores selecionados relativos aos processos de erosão e transporte de sedimentos, pelo que são mais ‘realistas’, embora apresentem alguns problemas no que diz respeito à extrapolação de dados.

Dos modelos que integram este tipo, todos consideram os processos de erosão linear (i.e. PSIAC - *Pacific Southwest Inter-Agency Committee*); FSM - *Factorial Scoring Model*), sendo aplicados normalmente a escalas variáveis. Por exemplo, o PSIAC é geralmente utilizado para analisar e comparar bacias hidrográficas de pequena dimensão (Kouhpeima *et al.*, 2011), enquanto o CORINE (*Coordination of Information on the Environment*) ou o EHU (*Erosion Hazard Unit*), se utilizam geralmente num contexto supra-nacional (EEA, 1992), nacional ou regional (Le Gouée *et al.*, 2010).

Aliás, embora não façam parte dos quadros que constam em anexo, há outros modelos que em parte podem ser considerados de carácter semi-quantitativo, mas que estão orientados para estudos que visam uma avaliação global da degradação dos solos (Grimm *et al.*, 2002). Normalmente baseiam-se em inventários levados a cabo por ‘peritos’ (*expert opinion methods*), sendo os resultados expressos através de mapas que ilustram a distribuição espacial dos fenómenos avaliados. Inserem-se neste contexto o *Global Assessment of Soil Degradation* (GLASOD), ou o HOT SPOTS (De Ploey *et al.*, 1989; EEA, 2000). Salientamos ainda, embora seja um modelo fisicamente baseado, o Pan-European Soil Erosion Risk Assessment (PESERA), que define as perdas de solo à escala da Europa (Kirkby *et al.*, 2004).

3.2. CONSIDERAÇÕES EM TORNO DA UTILIZAÇÃO DOS SIG NA MODELAÇÃO DA EROSÃO

A utilização de modelos de erosão integrados em *softwares*, foi impulsionada a partir da década de 1990. Várias versões podem ser obtidas de forma livre na *internet*, muitas delas combinadas com bases de dados para parametrização dos modelos. Atualmente o uso destes *softwares* é uma mais-valia para a produção de resultados, com uma maior fiabilidade e dinâmica.

Os vários modelos de erosão hídrica focados, têm sido desenvolvidos no sentido da sua manipulação em sistemas de informação geográfica (SIG). Normalmente os modelos são criados ou adaptados através de programação analítica, em *scripts*, internamente nos *softwares* SIG.

Neste contexto, podemos referir o MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*), para o qual existe a extensão *ArcMusle* para o ArcGis, o qual possui igualmente uma interface para o MIKE –SHE (Karidas *et al.*, 2012). Por outro lado o modelo AGNPS aparece associado a vários *softwares*, mais precisamente *Arc/Info*, *Grass-Gis* e *HIDRISI*. O *software* livre *Grass-Gis* permite obter procedimentos aplicados em vários modelos, designadamente no TOPMODEL, ANSWERS, SWAT, MEDRUSH, SIMWE e o CASC2D. Para além disso, existem vários interfaces que são adicionados aos *softwares* de modelação de erosão e são obtidos gratuitamente. No caso do LISEM, existe para *download* o PCRaster onde a aplicabilidade do modelo é totalmente incluída. Por outro lado, usando o *software* IDRISI é possível obter o interface próprio do modelo WATEM, assim como para o Modelo WEPP é disponibilizado um interface gratuito - o GeoWEPP.

Para além destes, destaca-se ainda o SAGA GIS, no qual se obtém o modelo de erosão *Morgan Morgan Freaman* (MMF) bem como o TOPMODEL.

Mas independentemente destes aspetos específicos e do SIG a utilizar, são as suas características gerais (permitindo a aquisição, armazenamento, consulta, manipulação, análise, modelação e visualização de informação georreferenciada) que transformaram os SIG numa ferramenta de apoio adequada à resolução de questões de âmbito territorial a escalas diversificadas, nas quais se engloba a erosão de solos (Burrough, 1986; Smith *et al.*, 1987; Cowen, 1988).

Neste contexto poderíamos referir inúmeras potencialidades dos SIG, designadamente a criação de Modelos Digitais de Elevação (MDE's) a partir dos quais

podem ser gerados vários *inputs* dos modelos (i.e. declives, área de contribuição, exposição de vertentes), a incorporação dos vários parâmetros e o cálculo de equações permitindo gerar cartografia de suscetibilidade, ou até a criação do fluxo de trabalho necessário à obtenção do resultado final da aplicação de um dado modelo (*model builder*).

4. ESTUDOS EFETUADOS NO ÂMBITO DA EROSÃO HÍDRICA DOS SOLOS

Face à existência de uma vasta panóplia de estudos teóricos e metodológicos relacionados com a erosão hídrica de solos - alguns dos quais foram já referidos anteriormente, optamos por salientar neste ponto os que podem ser considerados uma referência pelo seu carácter pioneiro, a nível internacional. Assim, será dado particular destaque aos trabalhos desenvolvidos nos EUA que culminaram com a definição da *Universal Soil Loss Equation* (USLE), assim como estudos e projetos que na Europa são marcos importantes.

Na sequência desta abordagem focaremos os trabalhos realizados em Portugal, centrando-nos sobretudo em referências que, de certa forma, são uma base de consulta obrigatória para investigadores que pretendem desenvolver esta temática no contexto do território nacional.

4.1. REFERÊNCIAS DE ÂMBITO INTERNACIONAL

O período compreendido entre 1930 e 1942, é considerado fulcral no contexto da problemática da erosão dos solos nos EUA. Com efeito, na sequência das políticas de conservação de solo que já desde 1907 vinham sendo implementadas, é nesta altura que o congresso norte-americano aprova a *Uniform Soil Conservation Law* e estabelece a criação do *Soil Conservation Service* (SCS), desbloqueando as verbas necessárias à investigação que vinha a ser desenvolvida no contexto da erosão hídrica de solos (Laflen e Moldenhauer, 2003; Sanders, 2004). Com efeito, as primeiras experiências de quantificação da erosão tinham já sido levadas a cabo em 1912 por A. W. Sampson no Utah, destacando-se posteriormente os trabalhos coordenados por M. F. Miller na *Missouri Agricultural Experiment Station*, onde implementa o uso de parcelas de erosão (Renard e Foster, 1985).

No entanto, é importante referir o contributo fulcral de H. Bennet, investigador do *United States Department of Agriculture* (USDA) *Bureau of Soils*, por vários autores

considerado o ‘pai’ da conservação dos solos nos EUA. Com efeito, Bennet presidiu ao SCS criado em 1935, sendo responsável pelo estabelecimento de 10 estações experimentais de erosão em várias áreas do país, com o objetivo principal de analisar os fatores condicionantes dos processos erosivos (Flanagan *et al.*, 2003). Estes estudos prolongaram-se durante vários anos permitindo a criação de mais estações experimentais e a consolidação de uma vasta base de dados. É no decorrer deste processo que são criados diversos ‘modelos’ de quantificação da erosão, dos quais se destaca a USLE - publicada em 1965¹³ e revista e reeditada em 1978 - de W. Wischmeier e D. Smith, ambos investigadores do *Agricultural Research Service* (ARS) do USDA, um ramo de investigação criado pelo SCS em 1953. Este modelo é um marco essencial da investigação em torno erosão hídrica de solos, tendo sido aplicado em diversos países, pesem as críticas relativas à sua utilização em contextos espaciais diferentes daquele para o qual foi desenvolvido (Zhang *et al.*, 1996; Boardman, 2006).

Mas como qualquer modelo experimental, a USLE foi sofrendo modificações. Em 1977 cria-se o *National Soil Erosion Research Laboratory* (NSERL), a partir do qual se pretendia iniciar uma nova geração de tecnologias de previsão de erosão, definindo-se então a *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE). Este modelo renovado e adaptado às novas potencialidades da informática, seria publicado ainda em 1977 sobre coordenação de K. Renard, G. Foster, G. Weesies, D. McCool e D. Yoder. Como os autores referem, a RUSLE (...) *is na update of Agricultural Handbook No. 537* [a versão revista da USLE de 1978], *containing a computer program to facilitate the calculations* [mas também] *includes the analyses of research data that were unavailable* (...) *Although the original Universal Soil Loss Equation (USLE) has been retained in RUSLE, the technology for factor evaluation has been altered and new data have been introduced with which to evaluate the terms for specified conditions*¹⁴.

No mesmo sentido, viria a ser desenvolvido o *Water Erosion Prediction Project* (WEPP), coordenado inicialmente por G. Foster, mas que seria publicado em 1995 por D. Flanagan e M. Nearing. Este modelo, fisicamente baseado, opera através de uma simulação da previsão de perda de solo - visando substituir o modelo de empírico da

¹³ . A primeira versão completa da USLE seria publicada em 1961, no ARS Special Report 22-66, com o título *A universal equation for predicting rainfall-erosion losses – An aid to conservation farming in humid regions*.

¹⁴ . Extraído do prefácio (p. xix) do *Agriculture Handbook* nº 703, intitulado *Predicting soil erosion by water; a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation*. USDA,

USLE - e tem sido amplamente aplicado, considerando alguns autores que é o único que teve sucesso na substituição da USLE (Flanagan *et al.*, 2007).

No entanto, Morgan *et al.* (1998, p.528) salientam que, mesmo com as alterações introduzidas, a sua utilização não é ainda adequada à realidade europeia, já que (...) *they simulate only total storm soil loss, and assume a steady surface flow profile* [situação que nos países europeus] *is rarely achieved*. Assim, embora os modelos norte-americanos sejam amplamente aplicados, na Europa começaram também a ser desenvolvidos modelos destinados a quantificar a erosão e a perda de solo considerando a especificidade dos fatores condicionantes dos processos, podendo destacar-se o *European Soil Erosion Model* (EUROSEM) e o PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment). Um resumo dos projectos/modelos que têm sido implementados no âmbito do *European Soil Bureau* pode ser consultado em Grimm *et al.* (2002), sendo ainda importante referir as adaptações ao cálculo dos diferentes parâmetros da USLE em contexto europeu (Grimm *et al.*, 2003).

Tendo em conta estudos mais específicos e sobretudo relacionados com metodologias de aplicação *in situ*, não podemos deixar de fazer referência a alguns trabalhos que, principalmente a partir da década de 1980, foram dedicados à erosão hídrica de solos em Espanha.

Neste contexto, salienta-se, talvez como marco inicial (pesem alguns trabalhos empíricos desenvolvidos a partir de 1940), a publicação em 1988 do manual *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*, de M. Sala e F. Gallart, onde são apresentados alguns instrumentos e técnicas utilizadas no estudo da erosão hídrica (Soares, 2008).

Na sequência deste manual, alguns autores desenvolvem estudos relativos à aplicação de instrumentos específicos em medições *in situ*, propondo modificações ou introduzindo novas técnicas. Refira-se, por exemplo, o trabalho de Gonzalez Hidalgo e M. Echeverria (1990), que aborda a instalação de uma estação experimental de erosão destinada a quantificar as perdas de solo numa região semi-árida, ou as considerações de García González (1990) sobre a utilização das caixas de Gerlach para avaliar a ‘erosão superficial na Extremadura’.

Em 1991, M. Sala, J. Rubio e J.M. Garcia Ruiz publicam o livro *Soil erosion studies in Spain*, onde são divulgados vários estudos e projetos desenvolvidos em Espanha sobre a temática em questão. Neste contexto, merece especial referência o

Proyecto de Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo (LUCDEME), apresentado em 1981 pelo Governo Espanhol (como resposta à United Nations Conference on Desertification que teve lugar em Nairobi em 1977), visando, entre outros objetivos, identificar as áreas mais afetadas pela erosão hídrica (Carrera Morales, 1990).

O LUCDEME foi de certa forma a base de outras iniciativas e projectos posteriores, com destaque para a criação, em 1995, da Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación (RESEL), constituída por 48 campos experimentais que integram bacias hidrográficas ou parcelas nas áreas mais afetadas pela erosão em Espanha (Ibáñez et al., 1999; Rojo, 2008).

Ainda neste contexto, podemos salientar o estudo *Respuesta de pequeñas cuencas en ecosistemas mediterráneos: monitorización, experimentación y modelización*, coordenado por F. Gallart no período compreendido entre 1987 e 1991, ou os trabalhos desenvolvidos nas estações experimentais de Ravelo (Tenerife), ou em La Higuera (Toledo) (Rodríguez Rodríguez, et al. 2002; Sánchez-Ándrez et al. 2005).

Por fim, pode-se destacar um dos últimos trabalhos desenvolvidos, *Evaluación sistemática de los efectos sobre el suelo de las repoblaciones forestales para la lucha contra la desertificación en las cuencas del Adra y Guadalfeo*, coordenado por R.J. Serrano e publicado em 2011.

Várias outras referências poderiam ser citadas sobre temáticas relacionadas com a erosão, designadamente sobre os seus fatores condicionantes, considerando, por exemplo, os efeitos da precipitação nas perdas de solo (*i.e.* López Bermúdez e Romero Diaz, 1992-93; Jordan e Bellinfante, 2000) aspetos relacionados com a erodibilidade (*i.e.* Boix et al., 1996), ou a importância do coberto vegetal (Ubeda e Sala, 2001).

Salientam-se, ainda, publicações decorrentes de trabalhos que abordam a implicação dos fogos florestais nos processos erosivos, surgindo-nos M. Sala - desde a sua primeira publicação sobre o tema, em 1989, apresentando os “Primers resultats de la pèrdua de sòl i de nodriments posterior a un incendi florestal” - e F. Gallart como referências incontornáveis (Soares, 2008).

Se muito fica decerto por citar, as referências mais significativas sobre os estudos de erosão de solos em Espanha têm sido alvo de várias publicações. Assim, após o já referido *Soil erosion studies in Spain* publicado em 1991, A. Cerdá publica em 2001 o

artigo ‘La erosión del suelo y sus tasas en España’, no qual discute metodologias aplicadas na quantificação da erosão nos projetos efetuados até à data, assim como, de acordo com o título, apresenta as taxas de erosão obtidas por vários investigadores em diferentes áreas do território. Mais recentemente (2009), a *Sociedad Española de Geomorfología* publicou o livro *La erosión del suelo en España*, da autoria de García Ruiz e López Bermúdez, que corresponde a uma síntese dos estudos desenvolvidos nos últimos 20 anos, focando, entre outros aspetos: os fatores de erosão do solo em Espanha e os métodos de estudo utilizados, a relação entre a erosão e a vegetação, o uso do solo e os eventos extremos de precipitação, assim como engloba uma descrição dos projetos LUCDEME e do *Programa de Acción Nacional contra la Desertificación* (PAND). Por último, uma breve referência ao livro de Almorox Alonso *et al.* (2010) sobre *La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación*, que embora não aborde exclusivamente trabalhos desenvolvidos em Espanha, salienta os vários modelos de erosão que vêm sendo aplicados e as adaptações feitas no contexto do território nacional.

4.2. ESTUDOS DESENVOLVIDOS EM PORTUGAL

Podemos considerar que, em Portugal, começam na década de 1960 os primeiros estudos relacionados com a erosão hídrica de solos. Com efeito, sob a coordenação de Ernesto Baptista de Araújo, engenheiro agrónomo da Direção Geral de Hidráulica e Engenharia Agrícola (DGHEA), foram criados três centros experimentais em Valongo-Mirandela, Pinhão-Quinta de Santa Bárbara e o Centro de Investigação de Erosão de Vale Formoso (CEEVF), com o objetivo de quantificar as perdas de solo agrícola por erosão hídrica e implementar a aplicação de medidas e práticas de conservação de solo.

O CEEVF viria a assumir particular destaque, sendo considerado um dos mais importantes projetos associados aos estudos de erosão hídrica na Europa, principalmente pelo facto de ser o único centro experimental que detém uma série de dados completa, e de boa qualidade, desde a sua formação, em 1961, até ao presente. É importante referir que a estrutura deste centro se baseou nos campos experimentais implementados pelo USDA em várias áreas dos EUA, que Ernesto Araújo teve oportunidade de visitar, procedendo então à instalação de dezoito parcelas experimentais semelhantes às utilizadas por Wischmeier no desenvolvimento da USLE, assim como diversos instrumentos meteorológicos (Roxo, 2001). A base de dados do

CEEVF deu origem à publicação de vários trabalhos, entre os quais podemos destacar os de Ferreira *et al.* (1985) que utilizaram os dados do centro no âmbito da aplicação da USLE, a dissertação de mestrado de Tomás (1992) que aborda a erosão hídrica em solos agrícolas no sul de Portugal – temática que viria a retomar no seu doutoramento, intitulado *Modelos de Previsão da Erosão Hídrica em Solos Agrícolas* -, ou a tese de doutoramento de Roxo (1994) denominada *A Ação Antrópica no Processo de Degradação de Solos – A Serra de Serpa e Mértola*.

Mas apesar deste início marcante, os estudos de erosão de solos desenvolveram-se sobretudo, no território nacional, em associação com a problemática dos incêndios florestais (Soares, 2008). Neste contexto podemos considerar a importância de duas ‘escolas’, protagonizadas pela Universidade de Coimbra sob coordenação de Luciano Lourenço (Instituto de Estudos Geográficos) e, pela Universidade de Aveiro, Celeste Coelho (Departamento de Ambiente e Ordenamento do Território).

L. Lourenço, que possui uma vasta bibliografia nesta área, é diretor do Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais (NICIF) desde 1992, tendo exercido vários cargos institucionais. Os seus trabalhos debruçam-se sobre várias temáticas ligadas aos fogos florestais, com uma componente de destaque para a sua relação com a erosão de solos (i.e. Lourenço *et al.*, 1991; Lourenço, 2004a, 2009), os seus fatores condicionantes (i.e. Lourenço, 2004b; Lourenço e Bernardino, 2013); ou as metodologias e técnicas utilizadas nos estudos da erosão pós-incêndio (Lourenço, 1999; Lourenço, 2001).

C. Coelho iniciou o seu ‘percurso’ no domínio dos temas relacionados com os incêndios florestais praticamente no mesmo período que L. Lourenço (década de 1990). Coordenou vários projetos incidindo sobre a erosão hídrica pós-incêndio e a quantificação das perdas de solo associadas, contando na sua vasta bibliografia com vários estudos especificamente dedicados aos processos erosivos (i.e. Coelho *et al.* 1995; Coelho e Ferreira, 2004; Vieira *et al.* 2014), tendo sido inclusivamente responsável sobre o capítulo relativo a Portugal no livro *Soil Erosion in Europe*, editado em 2006 por J. Boardman e J. Poesen.

Sob sua orientação, vários estudantes de mestrado e doutoramento concluíram os seus trabalhos, podendo referir-se, a título de exemplo, as dissertações de C. Ferreira (1996-1997) - intitulada *Erosão Hídrica em solos florestais: estudo em povoamentos de Pinus Pinaster e Eucalyptus Globulus em Macieira de Alcôba – Águeda* – e de Boulet

(2011) - sobre o *Escoamento Superficial nos Eucaliptais da Serra do Caramulo* - , assim como a tese de doutoramento de A. Ferreira (2006) sobre os *Processos Hidrológicos e Hidroquímicos em povoamentos de Eucalyptus globulus Labill. e Pinus pinaster Aiton.*

Também na Faculdade de Letras da Universidade do Porto (FLUP) se desenvolveram alguns estudos que se coadunam com a temática da erosão. Assim, entre 1997 e 2001 A. Pedrosa coordenou o projeto *Processos Erosivos no Norte de Portugal: Definição de Áreas de Risco*, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). Envolvendo duas componentes principais, uma orientada para a erosão hídrica e outra para movimentos de vertente, este projeto esteve na base da dissertação de Silvério (2000) sobre a *Erosão Hídrica dos Solos na Serra da Aboboreira*, assim como enquadrou em parte a tese de Bateira (2001), embora esta última dedicada ao estudo dos *Movimentos de vertente, suscetibilidade geomorfológica e Sistemas de Informação Geográfica*. Mais tarde, também Soares (2008) ‘revisitaria’ em parte a base de dados deste projeto, discutindo a *Importância das Formações Superficiais no Âmbito dos Processos de Erosão Hídrica e Movimentos de Vertente no NW de Portugal*.

Entre 2004 e 2006, sob responsabilidade de C. Bateira, o Departamento de Geografia da FLUP participou no projeto TERRISC – *Recuperação de Paisagens de Terraços e Prevenção de Riscos Naturais*, integrado no Interreg III B – SUDOE e coordenado a nível geral pelo *Department de Medi Ambient i Natura do Consell de Mallorca* projeto - que contou também com a participação de investigadores da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra (NICIF), do *Parc National les Cévennes*, do *Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)*, do Departamento de Geografia da Universidade de Las Palmas de Gran Canaria e da Fundação El Solà. Os trabalhos desenvolvidos pelo grupo da FLUP foram aplicados em duas áreas amostra do vale do Douro - utilizando um desenho experimental que combinava bacias hidrográficas de pequena dimensão com a instalação de parcelas de erosão em terraços agrícolas com muros pedra em seco -, cujos resultados foram alvo de várias publicações (i.e. Bateira *et al.*, 2005, 2007a, 2007b; Soares *et al.*, 2010).

No contexto espacial do projeto anterior - os terraços agrícolas do Douro -, é importante fazer ainda referência à dissertação de Martins (2005), sobre *Processos de Erosão Acelerada na Região Demarcada do Douro*, cujo objetivo principal era compreender influência dos principais tipos de armação de terreno e os processos de

erosão hídrica dos solos. Também Catalão (2010) escolhe esta área para avaliar a *Erosão Hídrica na Bacia Hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas*, aplicando a USLE.

Utilizando o mesmo modelo - e para concluir -, refira-se a dissertação de Meneses (2011), que elabora um estudo alargado sobre a erosão hídrica no concelho de Tarouca recorrendo à USLE, mas propondo (...) *algumas modificações dos parâmetros que a compõem, face à informação disponível e local de aplicação (ob.cit., p.2)*.

Mas apesar dos vários estudos referidos, a utilização de modelos na elaboração de cartografia de suscetibilidade à erosão hídrica em Portugal e, particularmente nos socos do Douro, a uma escala de detalhe, é uma temática pouco trabalhada.

CAPÍTULO II - METODOLOGIA UTILIZADA NA AVALIAÇÃO DA EROÇÃO HÍDRICA DE SOLOS: INFORMAÇÃO DE BASE E CARACTERIZAÇÃO GERAL DOS MODELOS APLICADOS

*Each model type serves a purpose, and a particular model type may not categorically be considered more appropriate than others in all situations. Choice of a suitable model structure relies heavily on the function that the model needs to serve.*¹⁵

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Já anteriormente referimos, à semelhança do que traduz a frase anterior, que a escolha do modelo mais adequado a um determinado estudo relacionado com processos de erosão hídrica, está dependente de vários fatores: do(s) objetivo(s), da área de trabalho, das escalas de análise espacial e temporal, dos processos visados, dos parâmetros de entrada necessários e disponíveis.

Por outro lado, também salientamos ser cada vez mais frequente a utilização de modelos que incorporam uma mistura de procedimentos (não sendo empíricos, conceituais ou físicos ‘puros’), ou modelos que vão surgindo de progressivas alterações, assim como a utilização de módulos específicos (normalmente de modelos base física) para o cálculo de parâmetros de entrada. Salienta-se, ainda, a utilização dos SIG na obtenção, tratamento e análise da informação de base necessária, assim como no cálculo dos vários parâmetros, permitindo ainda traduzir a sua variação espacial e produzir cartografia que permite identificar e classificar a suscetibilidade à erosão.

Neste capítulo, vamos explicar a metodologia utilizada no nosso estudo de caso. Assim, serão apresentadas as características gerais de base dos modelos que vamos utilizar - a Equação Universal de Perda de Solo aplicando algumas variações da RUSLE e o modelo de Simulação de Erosão Hídrica (SIMWE, *Simulation of Water Erosion*) – justificando as opções e alterações introduzidas na determinação dos dados de *input*.

A seleção destes dois modelos baseou-se no facto de não existir nenhuma alternativa específica para áreas de terraços agrícolas, que alteram profundamente a topografia original.

¹⁵ . Merrit *et al.*, 2003, p.769.

Assim, consideramos a aplicação da versão revista da USLE, por ser um dos modelos mais utilizados para estimar a perda anual de solo por erosão hídrica, adaptando-se à informação disponível e ao objetivo principal que pretendemos concretizar. Desta forma, com este modelo é possível discernir as áreas mais suscetíveis através de uma estimativa da perda de solo por unidade de área e de tempo, que no fundo se traduz na perda de solo específica (Wischmeier e Smith, 1965).

Como referimos, em Portugal a aplicação deste modelo em áreas de socacos é escassa, pese o estudo efetuado na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Léngua por Catalão (2009) e Catalão e Pacheco (2010). É importante salientar que a conclusão deste estudo salienta que a maior percentagem da área da bacia se situa na classe das perdas de solo muito baixas, considerando os autores que a implementação de terraços funciona como elemento de controlo.

No nosso estudo de caso, uma das limitações que a este modelo se impunha é o facto de contemplar apenas a erosão em sulcos e entre sulcos (*rill and interrill erosion*), facto pouco favorável na medida em que a área de estudo apresenta ravinas (*gullies*), se bem que geralmente efémeras.

De forma a colmatar esta lacuna, procedeu-se à seleção do SIMWE pela sua aplicabilidade à formação de ravinas, salientando-se que este modelo nunca foi utilizado em Portugal, nem em áreas de terraços agrícolas.

A aplicação dos dois modelos implica uma sequência metodológica que apresentamos nas fig. 25 e 26, sendo possível comparar e validar os seus resultados através do inventário de campo efetuado previamente. Nos pontos seguintes explicaremos, mais pormenorizadamente, a metodologia seguida.

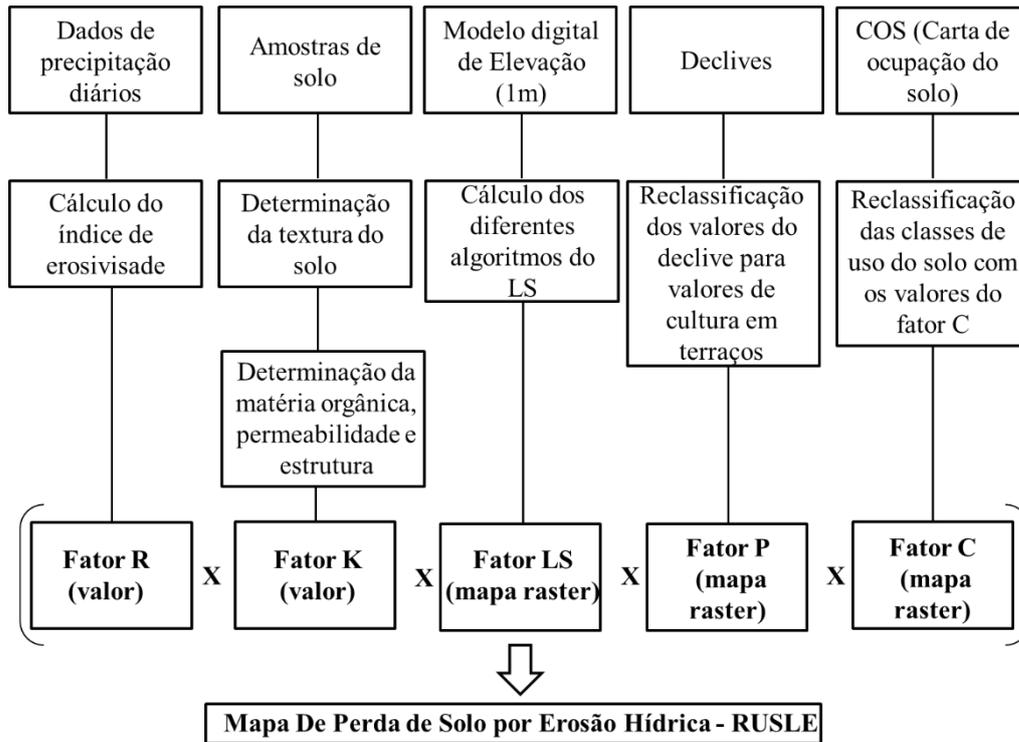


Figura 25 - Esquema metodológico da (R)USLE.

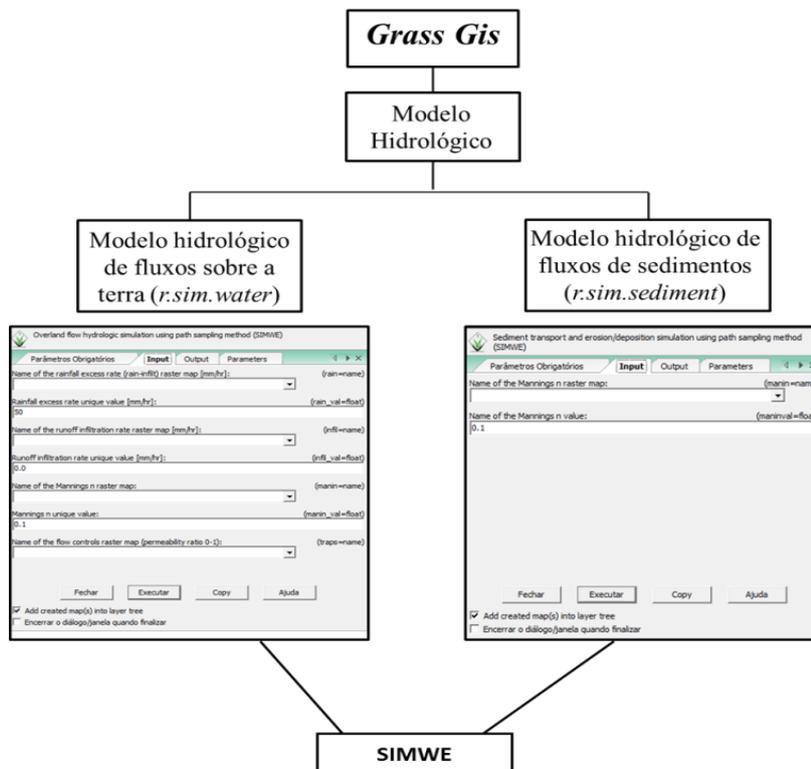


Figura 26 - Esquema metodológico do SIMWE.

2. INFORMAÇÃO DE BASE

A primeira etapa do nosso percurso metodológico, iniciou-se com o reconhecimento da área de estudo e a inventariação das feições erosivas. Assim sendo, procedeu-se ao levantamento de campo seguindo as diretrizes estabelecidas na ficha inventário previamente concebida (fig. 27) Convém referir que no campo 2 desta ficha ('Características e Indicadores da Feição') optamos por manter o termo *gully*, para aplicar a ravinas que evidenciavam maiores dimensões, correspondendo, basicamente, ao conceito de barranco tal como formulado por Rebelo (1982, 2003).

Projeto ModRis		Suscetibilidade a Processos Hidro-Geomorfológicos no Norte de Portugal: modelação matemática de base física e estatística Inventário de Erosão										
Ficha nº:		Quinta: S. Luiz										
Data do levantamento:												
1. Identificação e Localização												
Nº da Feição		Morfologia da vertente			Morfologia do Talude							
Coordenadas da Cabeceira	Latit:	Côncava <input type="checkbox"/>	Convexa <input type="checkbox"/>	Rectilínea <input type="checkbox"/>	Altura:	Largura:						
	Long:				Exposição:	Inclinação:						
2. Características e Indicadores da Feição												
Erosão Laminar:	<input type="checkbox"/>	Piping:	<input type="checkbox"/>	Sulcos:	<input type="checkbox"/>	Ravinas:	<input type="checkbox"/>	Gully:	<input type="checkbox"/>			
Presença de vegetação nas paredes e fundo:												
Elementos de concentração da água: Montante <input type="checkbox"/> Jusante <input type="checkbox"/>												
Medidas de estabilização antrópica:												
3. Medidas de Campo:												
Largura:												
Profundidade:												
Altura:												
4. Características da área de contribuição /Uso do Solo												
Vinha	<input type="checkbox"/>	Oliveira	<input type="checkbox"/>	Pinheiro	<input type="checkbox"/>	Eucalipto	<input type="checkbox"/>	Arbusto	<input type="checkbox"/>	Herbáceas	<input type="checkbox"/>	Outros:
Descrição Geral:												
Provável Causa da Formação:	Sistema de drenagem	<input type="checkbox"/>	Escoamento superficial	<input type="checkbox"/>	Escoamento sub-superficial	<input type="checkbox"/>	Precipitação	<input type="checkbox"/>				
	Litologia	<input type="checkbox"/>	Estrutura do solo	<input type="checkbox"/>	Saturação do solo	<input type="checkbox"/>	Antrópica	<input type="checkbox"/>				
Observações:												
5. Fotografia												

Figura 27 - Ficha inventário de feições erosivas na Quinta de S. Luiz.

Após identificação das feições erosivas no terreno, procedeu-se ainda a ensaios *in situ* (capacidade de infiltração, condutividade hidráulica e resistividade elétrica) e à recolha de amostras de solos para tratamento laboratorial (granulometria, teor de matéria orgânica), permitindo-nos obter informações que, embora não fundamentais para a aplicação dos modelos, permitem uma caracterização mais exaustiva das características do terreno. Reuniram-se, assim, informações de base que nos permitem modelar e cartografar os processos erosivos na área em estudo.

Neste contexto, foi ainda primordial a criação de um MDE, a partir do qual foi possível derivar algumas das variáveis essenciais para a modelação da suscetibilidade à erosão. O MDE gerado, com 1 metro de resolução, foi obtido a partir da manipulação de imagens aéreas de grande detalhe, adquiridas no âmbito do projeto MODRIS. A partir da sua manipulação no ArcGis (*3D Analyst e Spatial Analyst Tools*), foi possível derivar os parâmetros LS e P da equação universal de perdas de solo, que exercem uma forte influência no processo de escorrência e, conseqüentemente provocam variações no resultado da modelação. Também no SIMWE o modelo digital de elevação é imprescindível, sendo obrigatório na resolução do módulo de produção de sedimentos.

Quase todos os modelos de previsão de erosão e geração de sedimentos, requerem dados pluviométricos. No nosso trabalho, utilizamos como referência a informação de duas estações meteorológicas situadas na proximidade da área em estudo, a partir dos quais derivamos o valor do fator R e a taxa de precipitação, constituindo esta última um dado de entrada para a resolução do módulo hidrológico do SIMWE.

Os restantes parâmetros necessários à aplicação dos dois modelos, derivaram da manipulação da informação de base referida e de dados decorrentes dos ensaios *in situ*. Mas para que seja possível um melhor entendimento de toda a sequência metodológica necessária à prossecução dos nossos objetivos, designadamente da cartografia de suscetibilidade à erosão na área de estudo, apresentamos nos pontos seguintes, uma descrição mais pormenorizada dos passos necessários à aplicação dos modelos definidos.

2.1. A EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO

A Equação Universal de Perda de Solo (USLE), como já referimos, foi apresentada pela primeira vez por Wischmeier e Smith em 1961, sendo posteriormente alvo de revisão e publicação, pelos mesmos autores, em 1965 e 1978 (Laflen e Moldenhauer, 2003). Considerado um dos modelos mais aplicados à previsão anual de perda de solo por erosão hídrica, foi sendo alvo de diversas modificações. Williams e Berndt (1977), por exemplo, desenvolveram a MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) substituindo (...) *the rainfall erosivity factor, R with the product of rainfall amount and runoff amount in aim to predict soil erosion for a water erosion event* (Cârdei, 2010, p.250). Posteriormente, Renard e Freimund (1994) e Renard *et al.* (1997) propõem a RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*), pretendendo discernir a perda de solo por unidade de área e por unidade de tempo, mais precisamente a erosão específica, modelo que na atualidade já possui várias versões - embora retenha a estrutura da USLE - incorporando diferentes equações para o cálculo dos vários parâmetros em vez da utilização dos valores ‘tabelados’ do modelo original, pelo que pode ser utilizada em áreas com características distintas. A EUPS, que permite estimar a erosão média anual do solo, combina um conjunto de fatores condicionantes (fig.28), articulados a partir da seguinte equação:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Em que:

A - estimativa de erosão ($\text{ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$);

R - fator de erosividade da chuva;

K - erodibilidade do solo;

LS - fator conjugado declive e comprimento da vertente;

C - fator de cobertura do solo;

P - prática agrícola

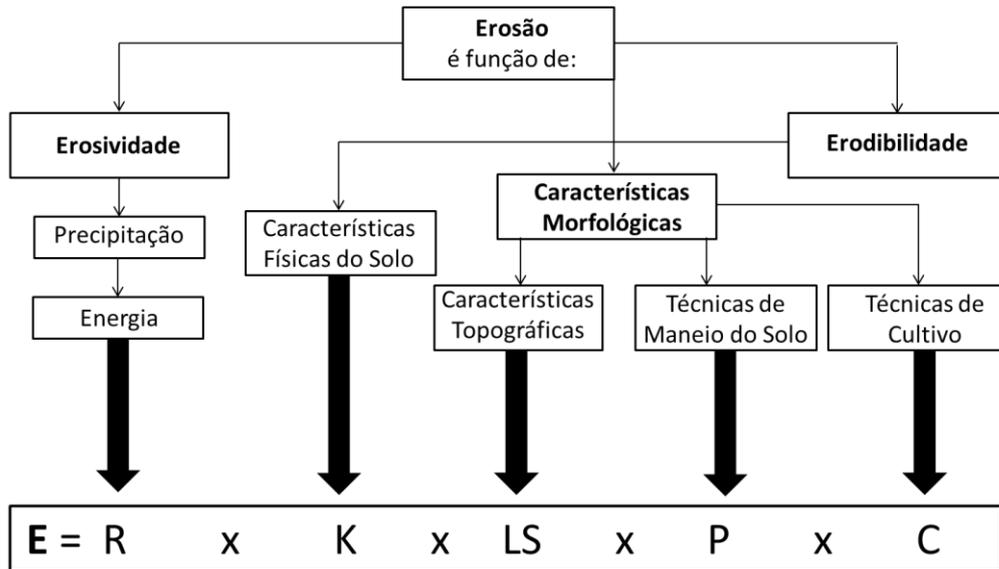


Figura 28 - Fatores que afetam a erosão hídrica do solo. Adaptado de Ferreira, 2008

2.1.1. FATOR EROSIVIDADE (R)

Este fator determina-se em função da intensidade da precipitação, traduzindo a sua capacidade em destacar e transportar as partículas do solo (Meneses, 2011). Segundo Wischmeier e Smith (1978) o fator R obtém-se a partir do índice de erosividade (EI30), mas o seu cálculo apenas deve considerar valores de precipitação igual ou superior a 12.5 mm, sendo apenas estes os ‘eventos’ considerados erosivos. O índice EI30 representa uma relação entre a energia cinética e a capacidade de transporte (Tomás e Coutinho, 1993).

Hudson (1986) propôs um índice de erosividade (KE25) onde considera apenas períodos em que a intensidade da precipitação é superior a 25 mm.h⁻¹. O autor justifica este valor como representando o limiar, obtido empiricamente por Ellison (1947), a partir do qual se observa o arranque das partículas de solo pelo impacto das gotas de chuva.

Por outro lado, Foster *et al.* (1981) propõem o cálculo da energia cinética da precipitação através da seguinte equação, no sistema de unidade internacionais.

$$e = 0.119 + 0.0873 * \log_{10}(I) \quad (\text{Se } I \leq 76 \text{ mm.h}^{-1})$$

Sendo:

e - energia cinética da precipitação em Mj/ha⁻¹.mm⁻¹;

I - intensidade da precipitação em mm/h⁻¹.

Pela exigência de dados bastante detalhados relativos à variação da precipitação descrita nas metodologias enunciadas, não disponíveis para a nossa área de estudo, no nosso trabalho optou-se pela metodologia sugerida por Bertoni & Lombardi Neto (1995). Assim, são consideradas as médias da precipitação mensal e anual (mm) para estimar o fator R (fig.29), de acordo com as seguintes equações.

$$EI = 89.5 * \left(\frac{r^2}{P} \right)^{0.85} \quad R = EI * 12meses$$

Em que:

EI - média mensal do índice de erosão (Mj/ha.mm);

r² - precipitação média mensal (mm);

P - precipitação média anual;

R - erosividade da chuva (Mj/ha.mm/ano).

Os dados de precipitação foram disponibilizados pela ADVID, correspondendo a duas estações meteorológicas localizadas em Adorigo (a primeira com as coordenadas N 41° 09' 33,00" W 7° 37' 02,00" e a segunda, N 41° 09' 19,70" W 7° 37' 00,90"), com registos desde 01-01-1994 a 01-07-2006. No entanto, para obter um conjunto mais fiável de dados (para um período de 29 anos), procedeu-se à seleção de outra estação, próxima das anteriores, nomeadamente a estação de Vale da Figueira do *Sistema Internacional de Informação de Recursos Hídricos* (SNIRH), com dados entre 01-01-1983 até 01-01-1994 e 01-07-2006 até 31-12-2012.

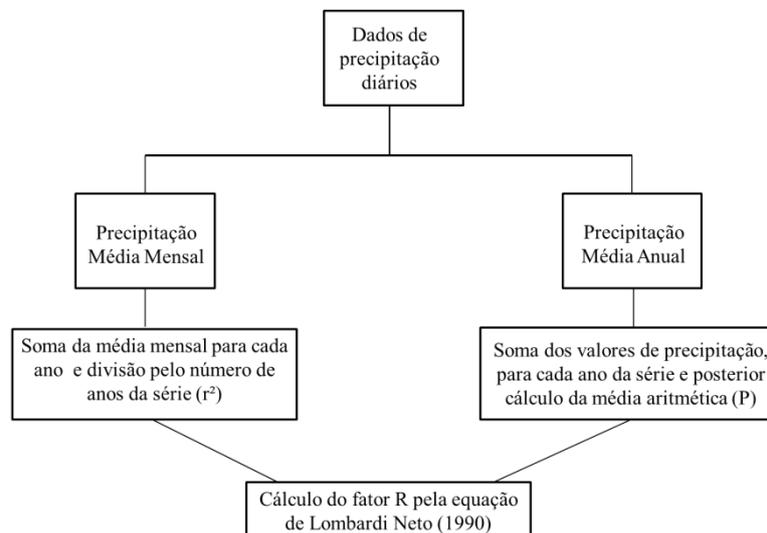


Figura 29 - Esquema metodológico do fator R.

2.1.2. FATOR DE ERODIBILIDADE (K)

A determinação da erodibilidade dos solos pressupõe o conhecimento dos seus constituintes no que se refere à textura, (expressa pelo conteúdo de areias, limo e argila) teor de matéria orgânica, bem como informação sobre a permeabilidade e a estrutura (Tomás, 1993).

Os valores de K, de acordo com a metodologia de Wischmeier e Smith (1978), foram originalmente definidos empiricamente através de resultados obtidos em parcelas experimentais, que culminaram com o desenvolvimento do (...) *soil erodibility nomograph that has been proven to be easily usable for estimating soil erodibility for most soils* (Laflen & W.C. Moldenhauer, 2003, p. 26). A partir deste nomograma é possível determinar o valor de K para qualquer tipo de solo - desde que sejam conhecidos os parâmetros textura/matéria orgânica/permeabilidade/estrutura - o que permitiu criar uma base de dados onde se especificam os valores a atribuir a este fator. Vários têm sido os países que procederam a uma adaptação dos valores de K às características específicas dos seus solos, salientando-se, para Portugal, o trabalho desenvolvido por Pimenta (1998).

No caso específico do nosso estudo, considerando tratar-se de uma escala de pormenor, não se justificava aplicar os valores pré-definidos. Assim, para a caracterização das propriedades físicas do solo, procedeu-se à recolha de várias amostras em diferentes locais, (topo meio e base da vertente côncava e convexa), incidindo apenas no horizonte A, na medida em que este é o mais suscetível à erosão. Posteriormente, as amostras de solo foram tratadas em laboratório, onde foram determinados os parâmetros necessários (fig.30).

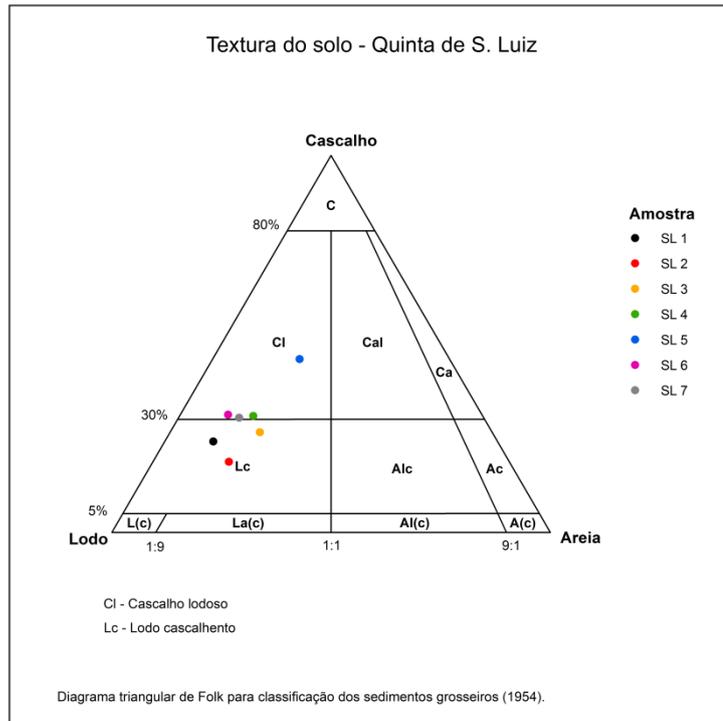


Figura 30 - Textura do Solo na Quinta de S. Luiz.

O processo implicou a secagem das amostras de solo, com a respetiva pesagem das mesmas antes e depois da entrada na estufa. As percentagens de areia (grosseira e fina) e cascalho foram obtidas por peneiração, enquanto o teor de finos (argila e limo) foi determinado por lavagem seguida de decantação.

Para o cálculo da matéria orgânica aplicou-se o método de remoção por ignição em mufla, proposto por Courtney e Trudgill (1984), determinando-se o seu valor pela diferença entre o peso inicial e o peso final de cada amostra, após combustão térmica a 700 ° C durante 3 horas.

Considerando os resultados obtidos para as amostras SL1 a SL7 (fig.30) e tendo em conta a sua relativa homogeneidade – o que seria de esperar já que na área em estudo se identificam apenas antrossolos - procedeu-se à soma dos valores estimados para cada amostra, determinando-se posteriormente a média aritmética para obtenção de um único valor para cada uma das 4 classes definidas por Wischmeier (1978).

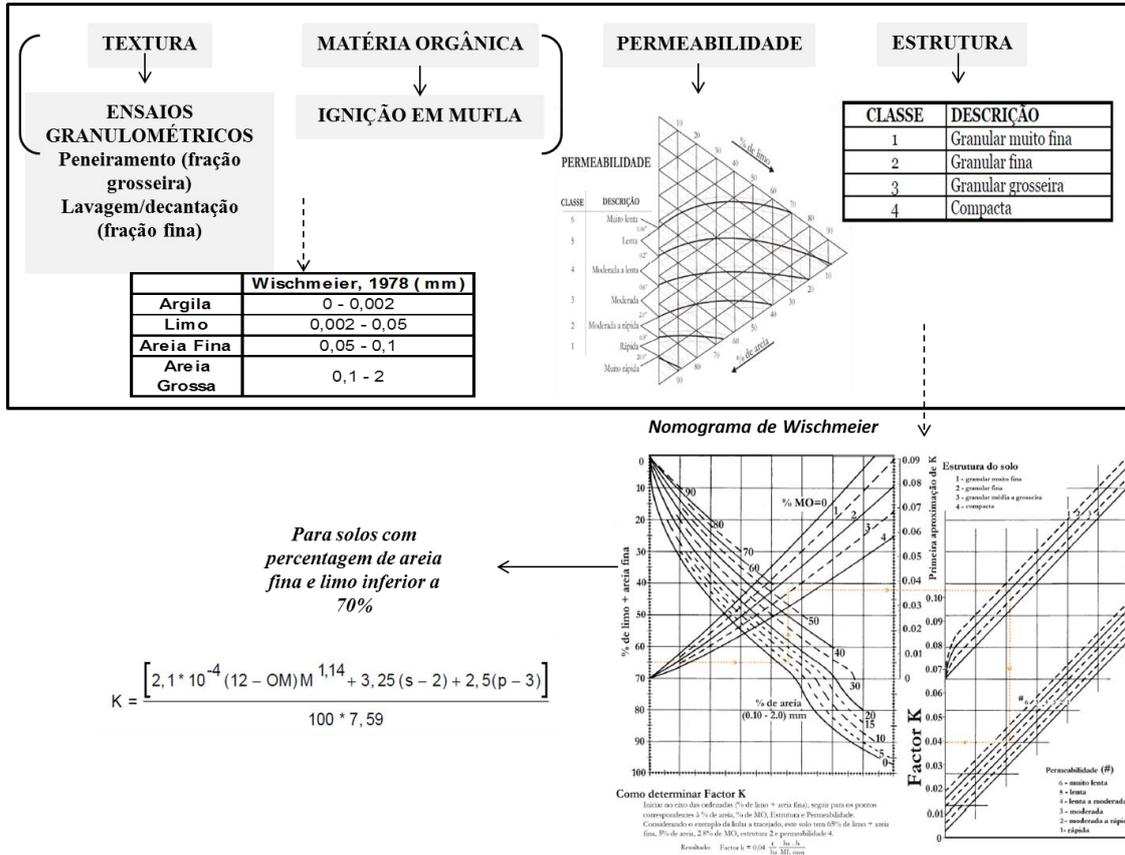


Figura 31 - Esquema de cálculo do fator K.

Para o parâmetro permeabilidade, foi seguido o procedimento expresso na fig. 31, que estabelece diferentes classes de permeabilidade em função da textura do solo, (Pimenta, 1998).

A estrutura do solo foi uma vez definida de acordo com as quatro classes propostas por Wischmeier e Smith (1978).

Como referimos, uma vez na posse dos 4 parâmetros necessários, é possível utilizar o nomograma de Wischmeier e Smith (*ob.cit*) – posteriormente adaptado por Foster *et al.* (1981) - para definir o valor de K.

No entanto, segundo Tomás (1998), sempre que o solo apresenta uma percentagem de areia fina e limo inferior a 70% a erodibilidade deve ser calculada a partir da equação seguinte, procedimento que adotamos:

$$K = \frac{2,1 \cdot 10^{-4} (12 - OM) M^{1,14} + 3,25 (s - 2) + 2,5 (p - 3)}{100 \cdot 7,59}$$

Em que:

K - erodibilidade ($\text{ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$);

M - parâmetro que define o tamanho das partículas, corresponde ao produto (% limo + areia muito fina) * (100 - % argila), sendo % argila = 100 - limo + areia muito fina - areia muito grossa.

Os resultados do fator K obtidos em unidade SI (sistema internacional de unidades de 0-0,10), que por sua vez é passível de ser convertido em unidades métricas, com efeito apenas se multiplica o valor K por 9,8 (valor da aceleração da gravidade em m.s^{-2}) (Pimenta 1998).

2.1.3. FATOR TOPOGRÁFICO (LS)

Este fator estabelece uma relação entre o comprimento (L) e o declive (S) de uma vertente, constituindo um dos fatores que maior influência exerce sobre a erosão, embora seja muito condicionado pelo tipo de cobertura do solo (fator C) e pela prática agrícola (fator P), assim como pelos aspetos texturais traduzidos pelo fator K.

No caso específico do nosso estudo é sem dúvida um dos parâmetros mais complexos, porque a armação do terreno em socacos impõe uma alteração vincada da topografia original. Aliás, como refere Simões (2013, p.8), o seu cálculo (...) *sempre apresentou limitações em áreas de relevo complexo ou de grande extensão, contribuindo muitas vezes para estimativas erradas de erosão do solo*. Assim, foi imprescindível a utilização do MDE de pormenor referido, assim como decidimos aplicar diferentes equações no cálculo do LS para aferir a que melhor resultado originava no modelo final.

No processo histórico de desenvolvimento da EUPS, várias equações foram sendo propostas para a determinação deste fator¹⁶, mas sempre tendo em conta as características das parcelas experimentais utilizadas - que, embora incorporassem variações, apresentavam, segundo Renard *et al.* (2011), um comprimento de 22.13m, largura de 1.8m e um declive uniforme de 9% -, culminando na seguinte expressão:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065)$$

¹⁶ . Sobre este assunto, consultar García Rodríguez e Giménez Suárez, 2010.

Em que:

λ - corresponde ao comprimento;

θ - declive;

m - representa um expoente com valores de 0.5 se $s > 5\%$; 0.4 se $3\% < s \leq 5\%$; 0.3 se $1\% < s \leq 3\%$; 0.2 para $s \leq 1\%$.

Posteriormente, visando a sua adaptação a áreas com declives inferiores ou superiores a 9%, McCool *et al.* (1987, citado por García Rodríguez e Giménez Suárez, 2010), derivaram as seguintes relações:

$$\begin{aligned} S &= 10.8 \sin \theta + 0.03, & \text{slope gradient} \leq 9\% \\ S &= 16.8 \sin \theta - 0.50, & \text{slope gradient} > 9\% \end{aligned}$$

Como já referimos, neste trabalho procedemos a um estudo comparativo do cálculo do LS, considerando as propostas de cinco autores. Uma das metodologias adotadas foi a de Engel (1999) e Simms *et al.* (2003), que definem a seguinte equação:

$$LS = \left(\frac{FA * TC}{22.13} \right)^{0.4} * \left(\frac{\sin S}{0.0896} \right)^{1.3}$$

Em que:

FA - corresponde ao fluxo acumulado (*Flow Accumulation*);

TC - é o tamanho da célula (*Cell Size*);

S - é o declive em graus.

Os procedimentos para o seu cálculo realizaram-se no *software* ArcGis 10.2, a partir do modelo digital de elevação (MDE) - com curvas de nível de equidistância de 1 metro - a partir do qual foram derivadas as variáveis necessárias para a determinação do comprimento das vertentes, mais precisamente a direção e acumulação dos fluxos.

Na variável da direção dos fluxos, cada célula adquire um valor de acordo com a direção das oito células de menor altitude relativamente à célula central do conjunto. A partir desta variável determinou-se o fluxo acumulado, ou seja o número de células acumuladas de montante para jusante da área de contribuição considerada. Esta variável traduz apenas os valores dos pixels acumulados em detrimento do comprimento real das vertentes (Meneses, 2011).

Após este procedimento aplicou-se a equação no *raster calculator* para obter o mapa resultante do fator LS, segundo a metodologia em questão.

Outra metodologia que aplicamos, utilizada no modelo USPED (Mitasova *et al.*, 1996), incorpora o cálculo do comprimento da vertente (L) e do declive (S), através das seguintes expressões:

$$L = (m + 1) \left(\frac{\lambda_A}{22.1} \right)^m$$

Em que:

λ_A - área de contribuição;

m - coeficiente empírico cujos valores recomendados são: 0,2 para declive menores que 1%; 0.3 de 1 a 3%; 0.4 de 3.5 a 4.5%; e 0.5 para declives superiores a 5%

O valor adotado neste trabalho foi 0.5, considerando que a área em estudo apresenta declives médios superiores a 5%.

$$S = \left(\frac{\sin(0.01745 \times \theta_{deg})}{0.09} \right)^n$$

Em que:

θ - é representado pelo mapa de declives (em graus);

0,09 - constante associada ao declive;

n - expoente que depende do tipo de fluxo e das propriedades do solo. Neste caso o valor aplicado foi de 1.6, tendo em conta que prevalece o tipo de erosão em sulcos (rills).

Para obter o fator LS multiplica-se o resultado das duas equações, com recurso ao *raster calculator* do ArcGis.

Aproveitando ainda a disponibilidade de outros algoritmos, aplicações e *softwares* que, a partir de MDE's permitem o cálculo deste parâmetro, foi também utilizada a ferramenta integrada nos módulos *Terrain Analysis – Hydrology – Topographic Indice*, do software *SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses)*, que combina procedimentos de variados softwares SIG. O *SAGA GIS* disponibiliza algoritmos de cálculo formulados por Moore *et al.* (1991), Desmet e Govers (1996) e Böhner e Selige (2006), implicando apenas, como dados de entrada, o declive e a área de contribuição.

Assim sendo, seguindo o algoritmo de Moore *et al.* (1991), obtém-se o fator LS pela aplicação da seguinte equação:

$$LS = \left(\frac{As}{22.1}\right)^m \times \left(\frac{\text{sen}\theta}{0,0896}\right)^{0,6}$$

Sendo que:

As - refere-se ao produto da acumulação de fluxo pelo tamanho da célula, (área de contribuição);

Θ - representa o declive em graus.

m – indica o comprimento do ângulo de inclinação

Segundo a proposta de Desmet e Govers (1996), pode-se obter o fator **LS** através das seguintes equações, desdobrando-as em função de declives inferiores e superiores a 9%

Para declives inferiores a 9%:

$$LS = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \times D^{m+2} \times 22,13^m} \times 10,8 \sin \theta + 0,03^\circ$$

Para declives superiores a 9% a equação é a seguinte:

$$LS = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \times D^{m+2} \times 22,13^m} \times 16,8 \sin \theta - 0,5^\circ$$

Em ambas as equações:

A(i,j) - refere-se à área de contribuição de uma célula com coordenadas (**i, j**) em m²;

D - resolução espacial ou tamanho da célula em metros;

x - valor da direção do escoamento;

Θ - inclinação da vertente em graus;

m - fator dependente do declive.

Este algoritmo emprega o conceito de área de contribuição e requer a geração de um mapa de fluxos acumulados. Para cada pixel calculam-se a declividade, a direção do fluxo e a quantidade de fluxo que se acumulou a montante daquele pixel (Silva, 2003).

Por fim, seguindo o algoritmo de Böhner e Selige (2006) calculou-se o LS – que os autores intitulam de índice de transporte de sedimentos - através da seguinte equação:

$$STI_S = \left(\frac{CA^{0.5}}{22.13} \right)^{0.5} (65.14 \sin^2 \beta_{CA} + 4.56 \sin \beta_{CA} + 0.065) \quad \text{for } \beta_{CA} > 0.0505$$
$$STI_S = \left(\frac{CA^{0.5}}{22.13} \right)^{3 \cdot \beta_{CA}^{0.4}} (65.14 \cdot \sin^2 \beta_{CA} + 4.56 \sin \beta_{CA} + 0.065)$$

Em que:

(CA) – Área de contribuição

(β_{CA}) - ângulo médio da inclinação

2.1.4. FATOR COBERTURA DO SOLO (C)

Este fator é utilizado para refletir o efeito das práticas de cultivo na taxa de erosão, correspondendo, no âmbito da EUPS, ao quociente de perda de solo de uma parcela-tipo com um determinado tipo de cultura, em contraste com uma parcela-testemunho mantida permanentemente a descoberto, mas em que todas as outras condições são idênticas ((Yoder *et al.* ano; Wischmeier e Smith 1978; Pimenta 1998). De acordo com McCool *et al.* (1995), responsáveis pela definição da RUSLE, é possível calcular o parâmetro C através do método dos subfactores, ilustrado pela seguinte expressão:

$$C = PLU * CC * SC * SR$$

Em que:

PLU - uso antecedente do solo;

CC - efeito de cobertura promovido pela vegetação;

SC - superfície ou densidade de cobertura do solo;

SR - rugosidade da superfície.

Todos estes subfactores são determinados através de fórmulas específicas¹⁷.

Deste conjunto de subfactores, os autores citados referem que o PLU expressa a influência que o tipo de cultivo anterior, a prática de cultivo dominante, a consolidação

¹⁷ . Para uma descrição detalhada de todos os cálculos necessários, consultar Foster *et al.*, 2003.

do solo, o tempo e a atividade biológica exercem sobre a erosão do solo. Já o subfactor CC representa o efeito do coberto vegetal na redução da energia do impacto da precipitação na superfície do solo, enquanto a cobertura do solo (SC) reduz a capacidade de transporte da água por escoamento superficial (Foster, 1982), diminuindo igualmente a área da superfície suscetível ao impacto das gotas de água (McCool, 1995). A rugosidade da superfície (SR), que pode ser orientada ou dispersa, relaciona-se, por exemplo, com a existência (ou não) de (...) *ridges and furrows left by "car-tracking" or a chisel plow used in the preparation of a seedbed* (Toy e Foster, 1998, p.5-14). Neste sentido, (...) *a rough surface has many depressions and barriers [pelo que durante] a rainfall event, these trap water and sediment, causing rough surfaces to erode at lower rates than do smooth surfaces under similar conditions* (Renard et al., 1997, p.160).

Na impossibilidade de obter todos os dados de caracterização do fator C de acordo com esta metodologia¹⁸, é possível recorrer à carta de ocupação do solo (COS) ou à *Corine Land Cover* (CLC) para identificar e cartografar o uso do solo, procedendo-se posteriormente à reclassificação das diferentes classes de uso em função de valores previamente definidos para este parâmetro. Este procedimento tem sido utilizado em vários trabalhos efetuados no território nacional (i.e. Tomás, 1997; Catalão, 2009; Meneses, 2011; Simões, 2013), tendo principalmente em conta os valores de referência apresentados por Tomás e Coutinho (1993) e Pimenta (1998a) para os diferentes tipos de cobertura e uso do solo.

No caso do nosso estudo optamos por seguir as diretrizes de Pimenta (*ob.cit.*), utilizando os valores apresentados na fig. 32. No entanto, a identificação e cartografia dos tipos de ocupação do solo foi elaborada com base no reconhecimento de campo da área em estudo e com recurso às imagens aéreas já referidas.

¹⁸ . Efetivamente, como salienta Tomás (1993), na determinação do fator C são muitas as variáveis a considerar, englobando, nomeadamente, o tipo de produção agrícola e a rotação de culturas – o que implica considerar também a estação do ano - a quantidade de resíduos existentes à superfície do solo, a densidade do coberto vegetal e o desenvolvimento de raízes, entre outras.

	AGRUPAMENTO	Factor K	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	FACTOR C
Territórios Artificializados 0.01	Zonas com dominância de habitações	0.01	1110	Tecido urbano contínuo	0.005
			1120	Tecido urbano descontínuo	0.01
	Zonas com revestimento predominantemente artificializado	0.01	1210	Espaços de actividades industriais, comerciais e de equip. gerais	0.01
			1220	Infraestruturas da rede de auto-estradas e da rede ferroviária	0.01
	Zonas alteradas artificialmente sem vegetação	0.3	1230	Zonas portuárias	0.01
			1240	Aeroportos	0.01
			1310	Pedreiras, zonas de extracção de areia, minas a céu aberto	0.5
			1320	Descargas industriais, zonas de espalhamento de lixos	0.1
	Zonas verdes ordenadas	0.02	1330	Estaleiros	0.01
			1410	Espaços verdes urbanos	0.02
Áreas com ocupação agrícola 0.3	Áreas agrícolas com culturas anuais	0.3	1420	Zonas com equipamentos desportivos e de ocupação dos tempos livres	0.02
			2110	Zonas de utilização agrícola fora dos perímetros de rega	0.4
	Culturas permanentes	0.1	2120	Perímetros regados	0.2
			2130	Arozais	0.05
			2210	Vinhais	0.2
			2211	Vinha + Pomar	0.15
			2212	Vinha + Olival	0.2
			2220	Pomares	0.05
			2221	Pomar + Vinha	0.1
			2222	Pomar + Olival	0.1
			2230	Olivais	0.1
			2231	Olival + Vinha	0.1
	2232	Olival + Pomar	0.1		
	Pastagens	0.02	2310	permanentes	0.02
	Zonas agrícolas heterogéneas	0.3	2410	Culturas anuais associadas às culturas permanentes	0.4
2420			Sistemas culturais e parcelares complexos	0.2	
2430			Terras ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais importantes	0.3	
2440			Territórios agro-florestais	0.3	
Florestas e meios semi-naturais 0.1	Florestas	0.1	3110	Folhosas	0.1
			3111	Sobreiro	0.1
			3112	Azinhais	0.1
			3113	Sobreiro / Azinhais	0.1
			3114	Castanheiro	0.1
			3115	Carvalho	0.1
			3116	Eucalipto	0.2
			3120	Resinosas	0.05
			3121	Pinheiro Bravo	0.05
			3122	Pinheiro Manso	0.05
	3130	Floresta com mistura de várias espécies florestais	0.05		
	Zonas com vegetação arbustiva ou herbáceas	0.02	3210	Pastagens pobres, trilhos	0.05
			3220	Landes e matagal	0.02
			3230	Vegetação esclerófitica (maquis, carrascal e esteval)	0.02
			3240	Espaços florestais degradados	0.1
	Zonas descobertas sem ou com pouca vegetação	0.4	3310	Pradas, dunas, areais e solos em cobertura vegetal	0.05
			3320	Rochas nuas	0.01
			3330	Estepes sub-desérticas	0.5
			3340	Zonas incendiadas recentemente	0.5
			3350	Neves eternas e glaciares	0
Meios equívocos 0.005	Zonas húmidas continentais	0.005	4110	Zonas assoladas	0.005
			4120	Turfeiras	0
	Zonas húmidas marítimas	0.005	4210	Sapais	0.005
			4220	Salinas	0.005
Superfícies com água 0	Zonas de água doce	0	4230	Zonas intertidais	0.005
			5110	Linhas de água	0
	Zonas de água salgada	0	5120	Pianos de água, lagos	0
			5210	Lagunas e corações litorais	0
			5220	Estuários	0
5230	Mar e Oceano	0			

Figura 32 - Classes do uso do solo LandCover – Corine e respetivo valor do fator C (Pimenta,1998).

2.1.5. FATOR PRÁTICA AGRÍCOLA (P)

As práticas agrícolas são um fator preponderante na erosão do solo, na medida em que influenciam o comportamento do escoamento superficial (i.e. orientação e velocidade), a quantidade dos sedimentos transportados e o desenvolvimento de feições erosivas (Wischmeier e Smith, 1978). Assim, o tipo de ‘configuração’ do terreno – ao longo das curvas de nível (*contouring*), em faixas (*stripcropping*) ou em terraços (*terraces*) – vai condicionar o padrão do escoamento, a que se associa o declive das áreas cultivadas. Por isso mesmo, embora sejam atribuídos diferentes valores de P à designada prática de conservação, esses valores aumentam em função do declive (quadro 3).

Quadro 3 Valores do Fator P de acordo com Tomás (1993). Extraído de Meneses, 2011.

Declive da superfície (%)	Prática de conservação		
	Cultura ao longo das curvas de nível	Cultura em faixas	Cultura em terraços
0 - 1	0,00	0,00	0,00
2 - 7	0,50	0,25	0,10
8 - 12	0,60	0,30	0,12
13 - 18	0,80	0,40	0,16
19 - 24	0,90	0,45	0,18
≥25	1,00	0,50	0,21

Para obter o fator P no nosso caso de estudo, derivou-se do MDE o mapa de declives, que foi reclassificado tendo em conta as classes e os valores apresentados no quadro anterior, relativamente à cultura em terraços.

2.2. SIMULATED WATER EROSION (SIMWE)

Considerando que a EUPS não contempla o processo de formação de ravinas (*gullies*), feição erosiva importante na nossa área de estudo, optamos por aplicar o modelo SIMWE desenvolvido por Mitas e Mitasova (1998). É um modelo bivariado (...) of erosion, sediment transport, and deposition by overland flow, designed for complex terrain, soil, and cover conditions, baseando-se na descrição do fluxo da água e transporte de sedimentos de acordo com as equações de Foster e Meyer (1972) e Bennet (1974), seguindo os princípios teóricos fundamentais do modelo WEPP de Flanagan e Nearing (1995) (Mitas e Mitasova, *ob.cit* p.505).

O fluxo de água superficial (*overland water flow*) é descrito pela equação de continuidade proposta por Julien *et al.* (1995):

$$\partial h(\mathbf{r}, t) / \partial t = i(\mathbf{r}, t) - \nabla \cdot \mathbf{q}(\mathbf{r}, t)$$

Em que:

$h(\mathbf{r}, t)$ -profundidade da água (*water depth*);

t - tempo;

$i(\mathbf{r}, t)$ - excesso de precipitação (*rainfall excess*);

$\mathbf{q}(\mathbf{r}, t)$ - fluxo de água (*water flow*);

$\mathbf{r} = (x, y)$ – parâmetros derivados do MDE

A equação de continuidade é acoplada à equação de conservação do momento e o raio hidráulico é aproximado pela profundidade do fluxo normal (Mitasova e Mitas, 1998).

O fluxo de sedimentos, (*sediment flow*), corresponde ao transporte de sedimentos pelo escoamento superficial e é descrito pela continuidade da massa do sedimento. Assim expressa-se pela seguinte equação proposta por Hann et al. (1994):

$$\partial [\rho c(\mathbf{r}, t) h(\mathbf{r}, t)] / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{q}_s(\mathbf{r}, t)$$

Em que:

$\mathbf{q}_s(\mathbf{r}, t)$ corresponde à taxa de fluxo de sedimentos por unidade de largura;

$c(\mathbf{r}, t)$ é a concentração de sedimentos;

ρ é a massa por partículas de sedimentos;

$D(\mathbf{r}, t)$ corresponde à taxa de deposição;

$D(\mathbf{r})$ é derivado através da relação entre a capacidade de transporte de sedimentos;

$T(\mathbf{r})$ corresponde à capacidade de transporte de sedimentos;

$|\mathbf{q}_s(\mathbf{r})|$ representa a taxa real do fluxo de sedimentos.

Para o cálculo da taxa real do fluxo de sedimentos aplica-se a seguinte equação proposta por Foster e Meyer (1972):

$$D(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) [T(\mathbf{r}) - |\mathbf{q}_s(\mathbf{r})|]$$

Onde $\sigma(\mathbf{r})$ se obtém através da seguinte equação (Foster e Meyer 1972):

$$D(\mathbf{r})/D_c(\mathbf{r}) + |\mathbf{q}_s(\mathbf{r})| / T(\mathbf{r}) = 1$$

$D_c(\mathbf{r})$ Corresponde à capacidade de desagregação.

Podem ser aplicadas diferentes equações de capacidade de transporte e capacidade de desagregação, no entanto neste trabalho utilizou-se a equação da tensão de cisalhamento (*shear stress*) proposta por Foster e Meyer (1972).

Como alternativa consistente e flexível ao método das diferenças finitas, Mitas e Mitasova (1998) propuseram uma abordagem estocástica baseada na função de Green resolvida pelo método de Monte Carlo. Assim procede-se a uma simulação através da geração de pontos de amostragem, que são posteriormente propagados de acordo com a equação Green Ampt e do cálculo da média das amostras, que vai fornecer uma

estimativa real dos mapas da profundidade da água (*water depth*) e concentração de sedimentos, com uma precisão estatística que é inversamente proporcional à raiz quadrada do número das amostras. Este procedimento é descrito pela equação seguinte:

$$\gamma(\mathbf{r}) = \int_0^{\infty} \int G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', p) \mathcal{S}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' dp$$

Esta equação é utilizada para expressar soluções lineares de equações diferenciais com aplicações físicas ou matemáticas, como se pode exemplificar nas teorias dos autores Karlin e Taylor (1981); Glimm e Jaffe (1972) expressas pela seguinte equação:

$$\frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', p)}{\partial p} = -\mathcal{O}G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', p); \quad G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', 0) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$$

Onde:

\mathbf{r}, \mathbf{r}' são as localizações;

p é o tempo,

δ é a função *Dirac*.

A região espacial é uma bacia hidrográfica delineada com 0 condições de contorno descrita por $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', 0)$. Estas equações podem ser resolvidas por métodos de projeção (Rouhiand Wright, 1995).

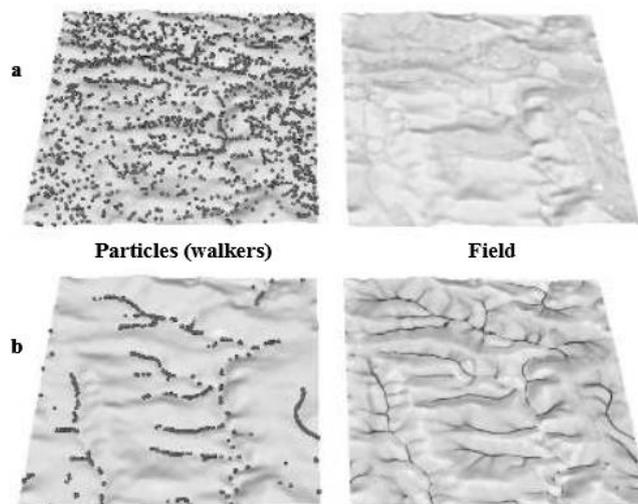


Figura 33 - Path sampling solution of the continuity equation for water depth $h(r)$ using duality between particle and field representation: a) water depth at 1 minute, b) water depth after 24 minutes. The grid is 416x430 cells at 10m resolution, Mitsova e Mitsova (1998).

Basicamente este método baseia-se na dualidade entre a representação das partículas e do campo distribuídas espacialmente. Assim a densidade das partículas distribuídas definem um campo, que por sua vez é representado por partículas que correspondem à distribuição espacial das suas densidades (Mitasova e Mitas, 1998), como se ilustra na figura 33.

No nosso caso de estudo, o modelo SIMWE foi aplicado no *software* GRASS GIS, através da utilização dos módulos: *r.sim.water*, que simula o escoamento superficial, e o *r.sim.sediment*, representando a erosão do solo, o transporte e a deposição de sedimentos (fig.34).

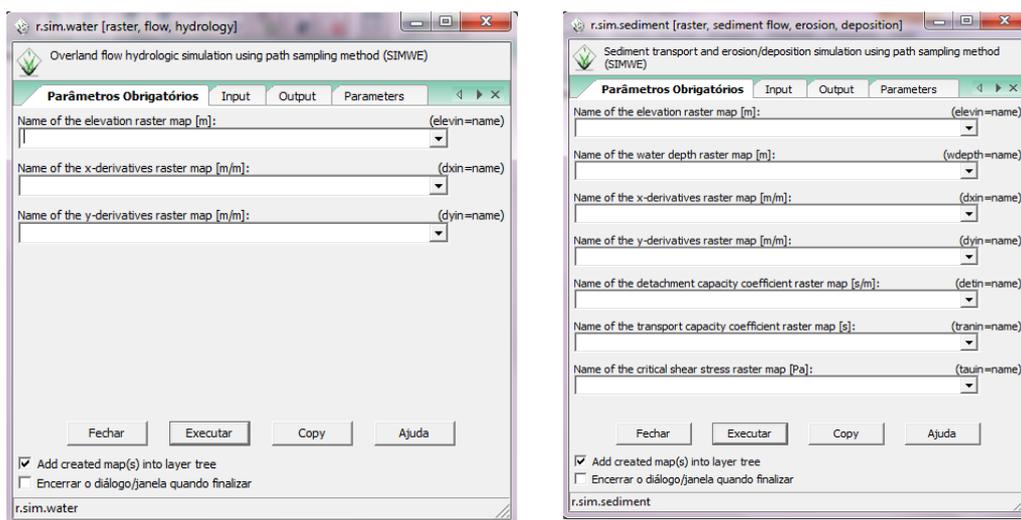


Figura 34 - - Módulos de cálculo do modelo SIMWE no Grass Gis.

No primeiro (fig.35), o fluxo superficial, apresentado em 2D, é descrito pelas equações de Saint Venant (Julien *et al.*, 1995) e pelo método estocástico de Monte Carlo. Os dados de entrada incluem o MDE (*elevin*), o vetor do gradiente do fluxo - derivado do MDE (*dxin* e *dyin*) - a taxa de excesso de precipitação (*rainfall excess*), através de um mapa raster ou de um único valor - como foi o caso neste trabalho - e a superfície do coeficiente de rugosidade (*manin*). Os resultados incluem o mapa da profundidade da lâmina de água em (m) (*water depth*) e o mapa de descarga da água (*water discharge*).

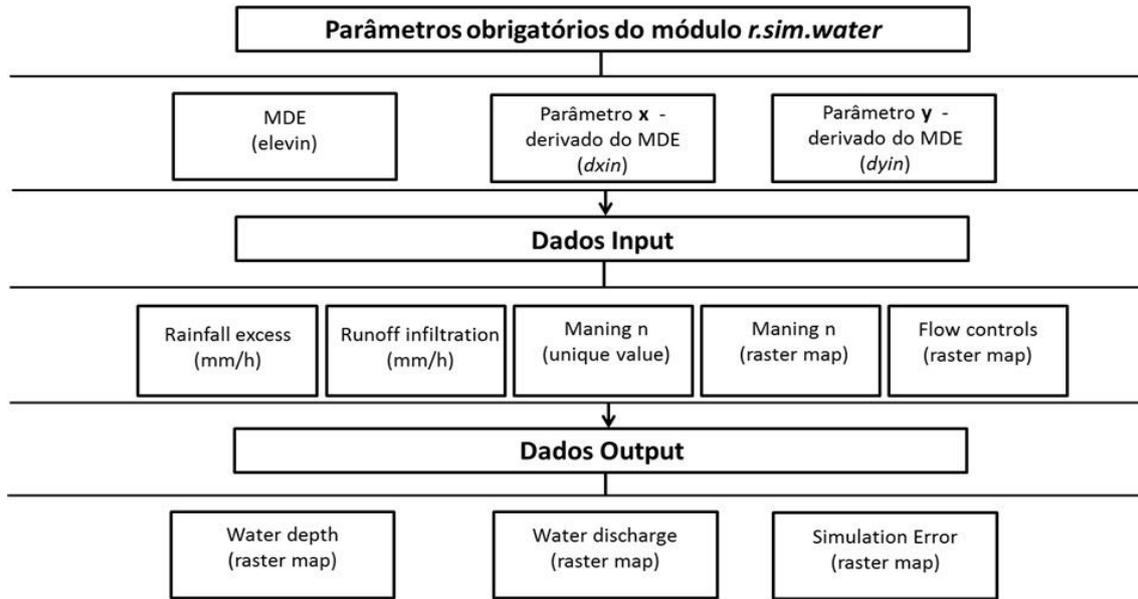


Figura 35 - Sequência metodológica do módulo *r.sim.water*.

O módulo *r.sim.sediment*, (fig. 36) vai incorporar alguns dos dados de saída do módulo anterior. Assim, engloba o MDE (*elevation*), o mapa *water depth*, gerado no módulo precedente, o coeficiente da capacidade de desagregação (*detin*), o coeficiente da capacidade de transporte (*tranin*), a tensão de cisalhamento (*tauin*) e o coeficiente de rugosidade (*manin*). Os mapas de saída são a capacidade de transporte, a capacidade de transporte limitada erosão-deposição, a concentração de sedimentos, o fluxo de sedimentos e por último o mapa de erosão-deposição.

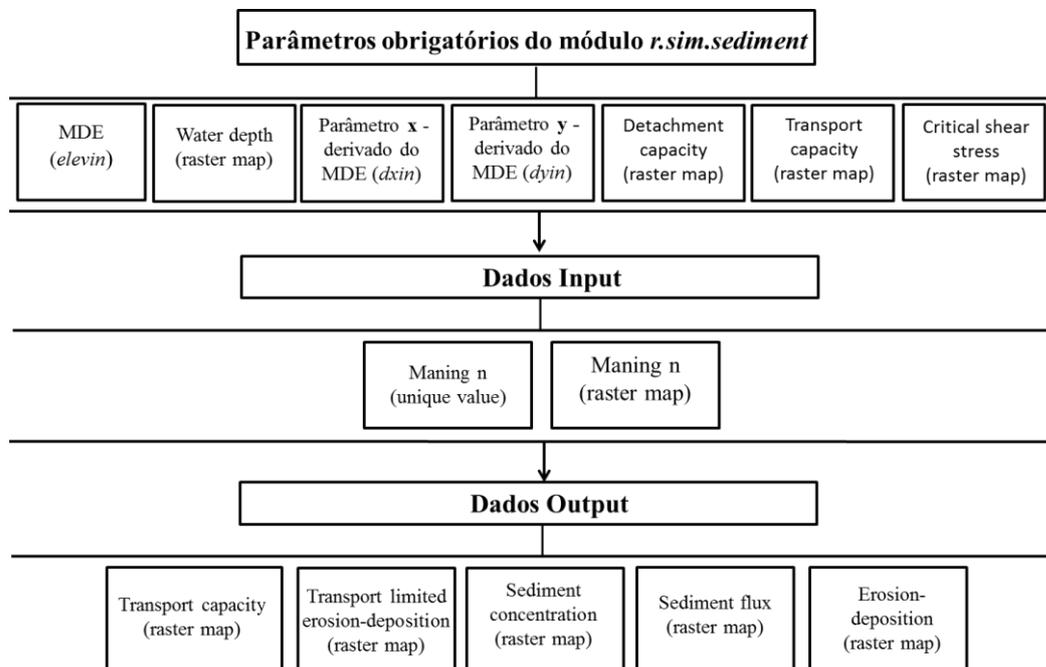


Figura 36 - Sequência metodológica do módulo *r.sim.sediment*.

2.3. MODELO PREDITIVO: REGRESSÃO LOGÍSTICA

A utilização deste modelo surgiu pelo facto de ser o mais comum na aplicação a amostras binárias, como por exemplo à ocorrência ou não de perda de solo numa determinada área.

Segundo Costa, (2009) a construção de um modelo preditivo, independentemente do 'processo' a modelar, deve-se assemelhar à realidade da área e ao fenómeno estudado. Neste sentido, torna-se importante uma análise das variáveis para discernir quais exercem maior influência na distribuição espacial do fenómeno, o que exige a elaboração de um inventário prévio onde este é identificado por pontos. Considerando a localização destes pontos de ocorrência e a distribuição aleatória de 'não-pontos', ou seja pontos não coincidentes com os locais das ocorrências permitindo apenas caracterizar globalmente o território, obtém-se, através do método da regressão logística, uma equação traduzida pelas ponderações a atribuir a cada variável face à sua relação com os 'pontos' e 'não pontos'.

$$p = \frac{1}{1 + \exp [-(a + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni})]}$$

Em que:

p - corresponde à probabilidade de ocorrência;

exp - eleva e (número de Euler, aproximadamente 2,72) ao valor entre parêntesis;

a - corresponde ao valor da interceção de **y**;

β - coeficientes de regressão;

X - variáveis independentes

Esta equação, na qual são incorporadas, em formato raster, as variáveis definidas, permite obter um mapa que ilustra a distribuição espacial da suscetibilidade de ocorrência dos processos. Por conseguinte, o método de regressão logística pode ser utilizado como um procedimento acessório para determinar as forças e fraquezas dos modelos que aplicamos (apesar dele próprio ser um modelo estatístico), permitindo

identificar áreas de maior e menor probabilidade de ocorrência das feições erosivas, numa escala de 0 a 1¹⁹.

No nosso caso, as feições erosivas levantadas *in situ* vão adquirir o valor de 1 ('pontos') e de 0 ('não pontos').

Para o nosso caso de estudo aplicamos este procedimento à (R)USLE, considerando apenas os fatores C, P e LS, uma vez que são os fatores que exercem mais influência no resultado da erosão hídrica potencial. No cálculo da regressão logística utilizámos o *software* SPSS, transpondo-se depois a equação derivada para o ArcGis 10.2.

2.4. PROCEDIMENTO DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Posteriormente à aplicação de métodos estatísticos torna-se necessário proceder à validação da (R)usle, com os diferentes algoritmos de LS, de forma a testar a precisão dos mesmos, discernindo qual apresenta maior qualidade.

Neste sentido, a curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) é um procedimento de validação que permite visualizar, organizar e selecionar classificadores tendo em conta o seu desempenho (Fawcett, 2006). Assim, este método é baseado no pressuposto que cada instância surge associada a uma classe preditiva. A distinção entre a classe real e a classe predita é efetuada através de **N** e **Y**. Por conseguinte para cada instância, associada a uma classe preditiva existem quatro resultados possíveis (Fawcett, 2006), no nosso caso adaptamos à temática em estudo.

TP – True Positive (verdadeiros positivos), são áreas classificadas como suscetíveis onde se registam feições erosivas.

FN – False Negative (falsos negativos), áreas onde não se verifica suscetibilidade à erosão, porém apresentam registos de feições erosivas.

TN – True Negative (verdadeiros negativos), área que não se apresenta suscetível nem se verificam registos de feições erosivas.

FP – False Positive (falsos positivos), área suscetível na qual se registam feições erosivas.

¹⁹. A regressão logística produz um operador da mesma maneira que uma regressão múltipla, contudo, difere uma vez que entra com dados binários de 0 a 1 (Landau, S. e Everitt, B. S., 2004, citado por (Costa, 2009 p. 89).

Desta forma, a partir a do resultado das métricas combinadas é possível a construção de uma matriz de confusão, apelidada também por tabela de contingência, que ilustra todos os resultados possíveis. Para além disso, através da matriz de confusão obtêm-se dados de cálculo dos rácios que integram o método de validação (quadro 4).

$$\text{Rácio Verdadeiro Positivo (hit trace/cal)} - \text{VP rácio} = \frac{\text{VP}}{\text{P}}$$

$$\text{Rácio Falso Positivo (false alarm)} - \text{FP rácio} = \frac{\text{FP}}{\text{N}}$$

$$\text{Sensibilidade} = \text{VP rácio}$$

$$\text{Especificidade} = \frac{\text{VN}}{\text{FP} + \text{VN}}$$

$$= 1 - \text{FP rácio}$$

$$\text{Precisão} = \frac{\text{VP}}{\text{VP} + \text{FP}}$$

$$\text{Valor preditivo positivo} = \text{Precisão}$$

$$\text{Acurácia} = \frac{\text{VP} + \text{VN}}{\text{P} + \text{N}}$$

Quadro 4 - Matriz de confusão/Tabela de contingência (Fawcett, 2006).

		Classes Verdadeiras	
		p	n
Classes Preditivas	Y	Verdadeiros Positivos	Falsos Positivos
	N	Falso Negativo	Verdadeiro Negativo
Soma		P	N

Salienta-se que este será o método aplicado para a validação do modelo (R)USLE, segundo os diferentes algoritmos do fator LS.

CAPÍTULO III - ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

1. A REGIÃO DEMARCADA DO DOURO

Este trabalho tem como área de estudo a Quinta de S. Luiz, que se localiza na freguesia de Adorigo, concelho de Tabuaço, distrito de Viseu, assumindo uma posição privilegiada na margem esquerda do Rio Douro (fig.37). Esta quinta, considerada uma das mais representativas da Região Demarcada do Douro (RDD), abrange uma área de 125ha, dos quais cerca de 70% plantados com vinhas de várias castas. Integrada na sub-região do Cima Corgo, salienta-se ainda o facto de estar englobada nos limites do Alto Douro Vinhateiro (ADV), reconhecido pela UNESCO como Património Mundial desde Dezembro de 2001.

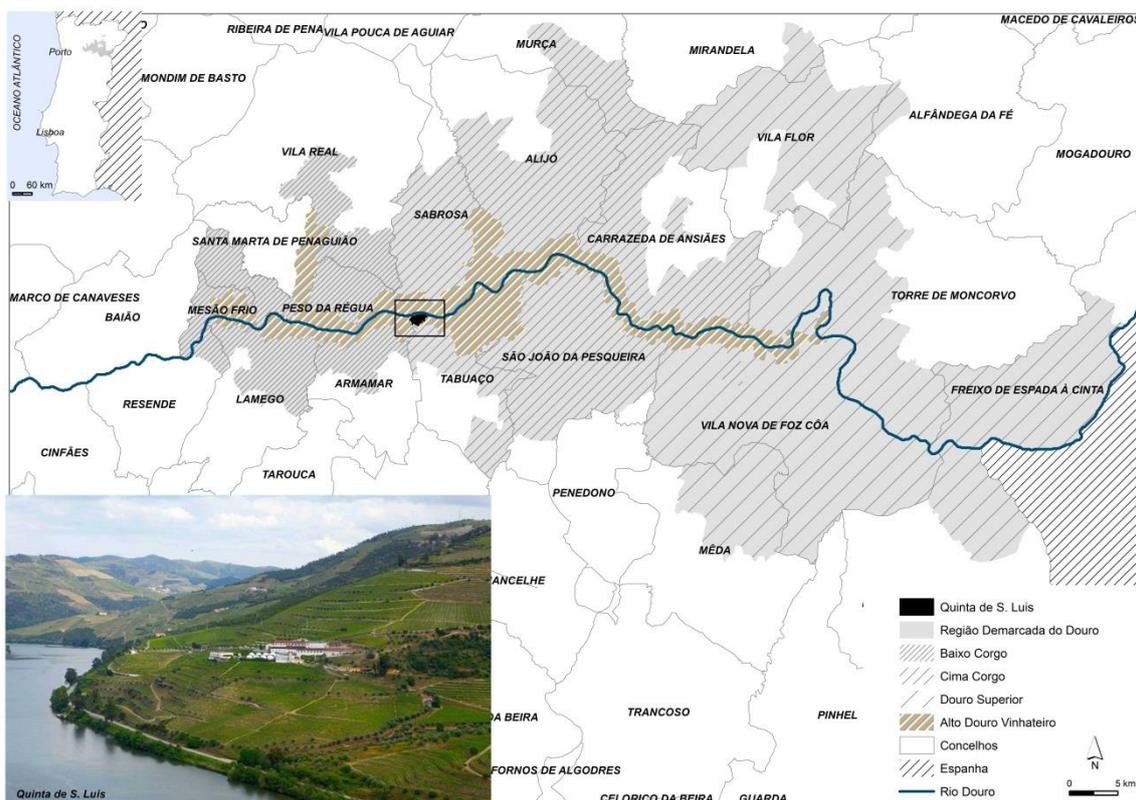


Figura 37 - Localização da área em estudo.

Constituindo uma área de excelência para a produção vinícola, o vale do Douro assumiu, pelo menos desde a época romana, uma posição de destaque pelas suas características geoestratégicas, mas sem dúvida que o contexto biofísico teve sempre um peso marcante pelo facto de proporcionar condições otimizadas para a cultura da vinha. Efetivamente, tal como é referido no documento do *World Heritage Committee* (p.3), o

Alto Douro é (...) *an outstanding example of a landscape that illustrates several significant stages in the history of mankind. From time immemorial, the valley of the River Douro has played a major role as a corridor of peoples and cultures that, at least since the time of the Romans, dedicated themselves to cultivating the vine*²⁰.

Este contexto esteve na base da definição da RDD, a mais antiga região vitícola demarcada e regulamentada do mundo, em associação com a criação da Companhia Geral da Agricultura das Vinhas do Alto Douro em 1756 (Sousa, 2007). Com efeito datam desta altura as primeiras demarcações (designadas pombalinas e decorrendo entre 1757 e 1761), que abrangiam 67 freguesias e uma área total de 40 000 ha, área que foi sendo progressivamente alargada até à configuração atual, similar à instituída pelo Decreto nº7934 de 10 de Dezembro de 1921 (Barbosa, 2006).

Constituindo uma ‘paisagem cultural evolutiva viva’ de beleza única, nela se conjugam o esforço do Homem na construção dos socalcos - (...) *amparados, tradicionalmente, por muros de xisto* [técnica necessária para] *cultivar a vinha nas encostas íngremes e pedregosas do Douro* - com características climáticas e morfoestruturais que ditaram a produção de um vinho famoso em todo o mundo (Aguiar, 2002, p.147). Efetivamente, se o quadro socioeconómico e cultural é responsável pela configuração atual desta paisagem, sem dúvida que foram os condicionamentos do meio que, simultaneamente, criaram as condições e exigiram do do Homem o engenho necessário à sua modelação.

1.1. O VALE DO DOURO E A RDD: CONTEXTO MORFOESTRUTURAL

O vale do Douro apresenta-se como um sistema geomorfológico que atravessa a Região Norte de Portugal no sentido Este-Oeste, ao longo de 210 km, desde a fronteira com Espanha até à sua desembocadura no oceano Atlântico, nas 'margens' das cidades do Porto e Vila Nova de Gaia (Pereira, 2009).

A sua topografia acidentada, que se caracteriza globalmente pelo profundo encaixe entre vertentes extensas de forte declive principalmente na parte portuguesa, é condicionada por uma estrutura geológica complexa, onde a rede de fracturação, dobras e deformações extensas expressas por cavalgamentos e mantos de carreamento se articulam com a diversidade das formações metassedimentares e rochas granitoides,

²⁰. In: *Nomination of Alto Douro Wine Region for the World Heritage List*. Disponível em <http://whc.unesco.org/uploads/nominations/1046.pdf>_Acedido em 22/01/2014.

num contexto fortemente influenciado pela orogenia Hercínica. Com efeito, o vale do Douro integra-se no Maciço Antigo, que, segundo Ribeiro (1979), constitui o fragmento mais contínuo do soco Hercínico da Europa, pelo que é constituído por um substrato rochoso de idade paleozóica e pré-câmbrica (Bateira *et al.*, 2011). No contexto deste, a RDD localiza-se na Zona Centro Ibérica (ZCI), incorporando uma pequena parte do bordo SW da Sub-zona da Galiza Média e Trás-os-Montes (fig.38).

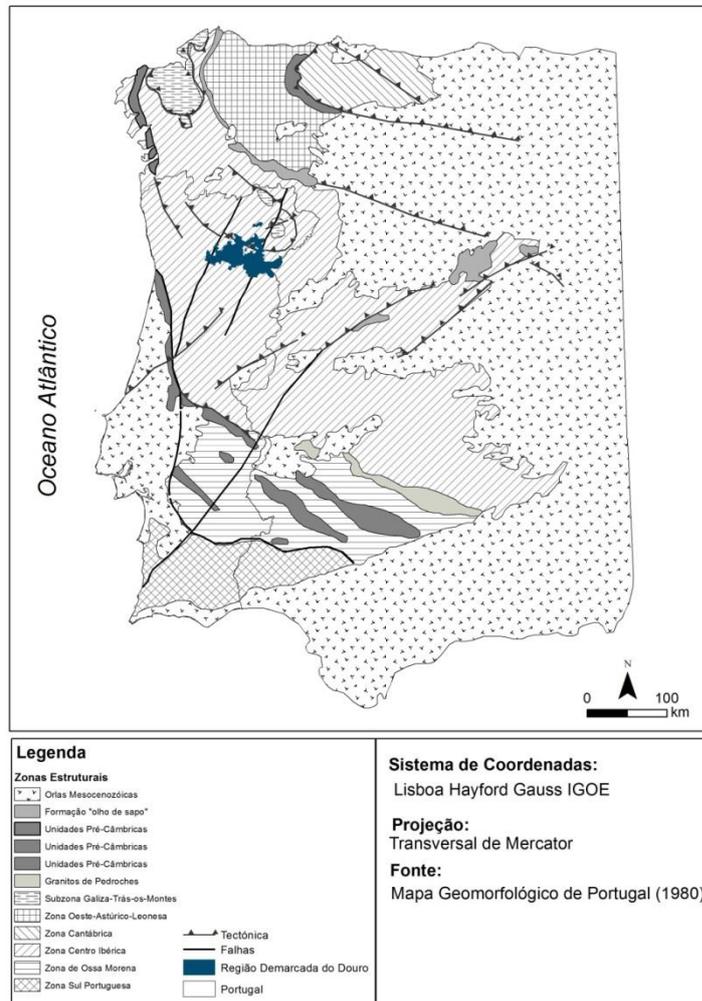


Figura 38 - Zonas Estruturais de Portugal Continental

A ZCI é um domínio bastante heterogéneo do orógeno varisco, incorporando vastos afloramentos de granitos de instalação condicionada pelas diferentes fases de deformação – com destaque para D3 - assim como por um conjunto de formações metamórficas, em que se destacam filitos, xistos e metagrauvaques, bem como vários alinhamentos quartzíticos (Moreira *et al.*, 2010). Estas formações, que de acordo com Pereira (2009) se formaram a partir da espessa sequência de sedimentos turbidíticos que colmataram o fosso marinho intracontinental que correspondia à ZCI - atuando a partir

de taludes alimentados de NE e E, ou seja a partir da plataforma câmbrica cujos contornos começavam a ganhar forma -, constituem o substrato dominante da RDD.

Correspondendo às designadas formações do grupo do Douro do super-grupo Dúrico-Beirão (anteriormente designado por ‘Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovícico’), incorporam, segundo Sousa e Sequeira (1989), dois grandes conjuntos de idade proterozóica superior a câmbrica inferior: 1) um autóctone, constituído pela Formação de Bateiras e Ervedosa do Douro; 2) outro alóctone, que integra as Formações de Rio Pinhão, Pinhão, Desejosa e S. Domingos (Sousa, 1985; Rebelo e Romano, 1986; Mc Dougall *et al.*, 1987; Moreira *et al.*, 2010).

Na área em estudo, afloram sobretudo as formações de Bateiras, Ervedosa do Douro e de Rio Pinhão (fig 39).

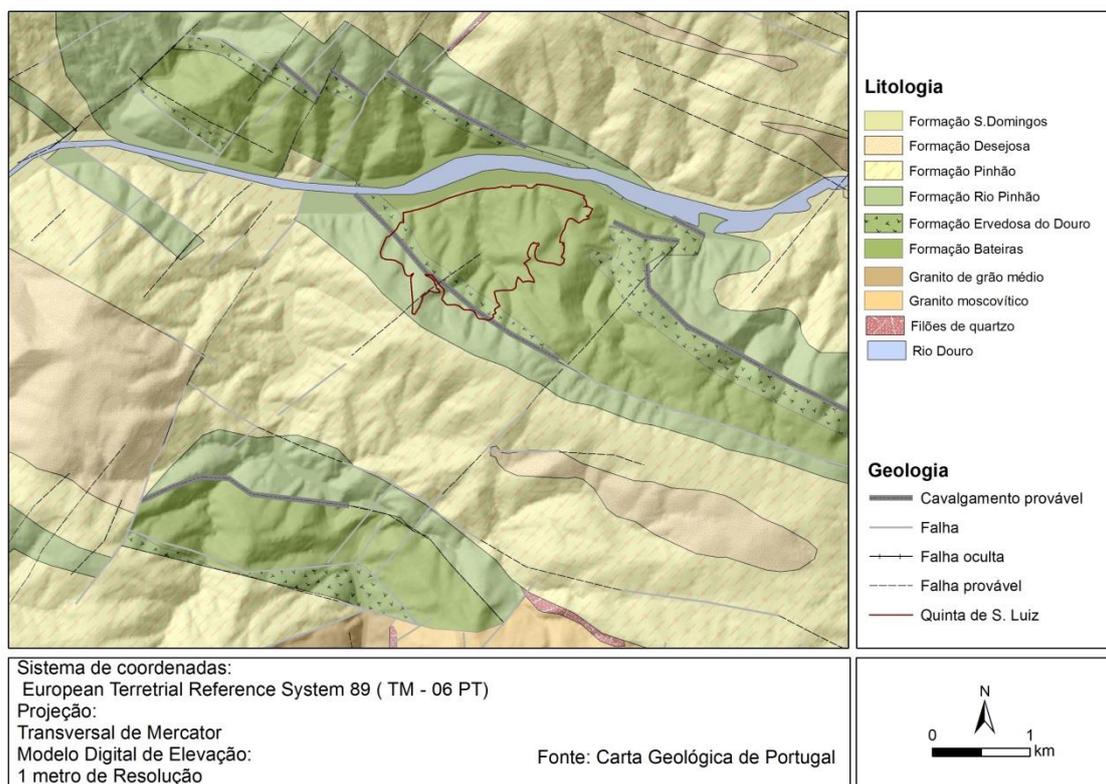


Figura 39 - Formações Geológicas da Quinta de S. Luiz.

De acordo com Sousa e Sequeira (*ob.cit. pag. 13*), a primeira constitui a unidade estratigráfica mais antiga do Grupo do Douro e a sua ocorrência manifesta-se no núcleo de três estruturas anticlinais da primeira fase hercínica: anticlinal de Aباças-Bateiras, anticlinal de Adorigo e anticlinal de Santo Adrião-Santa Leocádia. Os mesmos autores dividem esta formação em dois grupos, sendo o inferior constituído por xistos negros intercalados por metagrauvaques e filitos, enquanto o superior se

caracteriza pela ocorrência de níveis calcários associados a espessos metagrauvaques intercalados por filitos escuros e listrados.

A transição para a Formação de Ervedosa do Douro, verifica-se quando os filitos do topo da Formação de Bateiras passam a uma sucessão finamente estratificada de cor verde. Segundo Sousa, (1984, p.11), *assinala-se também a ocorrência de uma impregnação de magnetite, constituindo um horizonte (cerca de 10m de espessura) intercalado na formação.* De salientar de que esta formação possui uma espessura de 259 m e apresenta-se similar à formação do Rio Pinhão (Sousa, 1994).

Esta última, de carácter alóctone, é formada por metagrauvaques e/ou metaquartzovaques com intercalações filíticas finas, observando-se igualmente a presença de intercalações de xistos listrados (Sousa e Sequeira, 1989).

Toda a área da RDD foi extremamente marcada pela tectónica tardi-hercínica (gerando falhas que vão condicionar a abertura do oceano Atlântico durante o mesozóico), que é responsável pela formação de dois importantes desligamentos de direção geral NNE-SSW - que cortam a RDD - ao longo dos quais se deram deslocações verticais no ciclo alpino, particularmente durante o Cenozóico: no setor oriental o desligamento de Bragança-Vilariça-Manteigas e, quase no extremo ocidental, o de Verín-Réguia-Penacova (Bateira *et al.*, 2011). Mas se estes acidentes marcam de forma clara a estrutura e morfologia desta área, constituindo inclusivamente deformações ativas de acordo com Cabral e Ribeiro (1988), a eles se associou uma densa rede de falhas e fraturas para determinar a configuração geral do relevo.

Com efeito, desenvolvendo-se na unidade geomorfológica que Ferreira (1991) designou como 'Planaltos Centrais' de Trás-os-Montes - embora parte da sub-região do Douro Superior faça já parte da Meseta Norte - a RDD possui uma morfologia em que se destaca sobretudo o forte encaixe do rio Douro e dos seus afluentes principais, que apresentam tramos por vezes retilíneos ou evidenciando mudanças bruscas de direção, características que adicionalmente indiciam o seu condicionamento tectónico (fig 39). Este encaixe processa-se a partir de superfícies que se situam a cotas entre os 400_e os 700 m de altitude, abaixo das quais se configura, no essencial, a área abrangida pela ADV. Com efeito, esta área património mundial desenvolve-se até próximo dos 400m de altitude, sendo aqui que as vertentes assumem a topografia mais ilustrativa do Douro, com declives que em alguns sectores ultrapassam 40° (fig. 40).

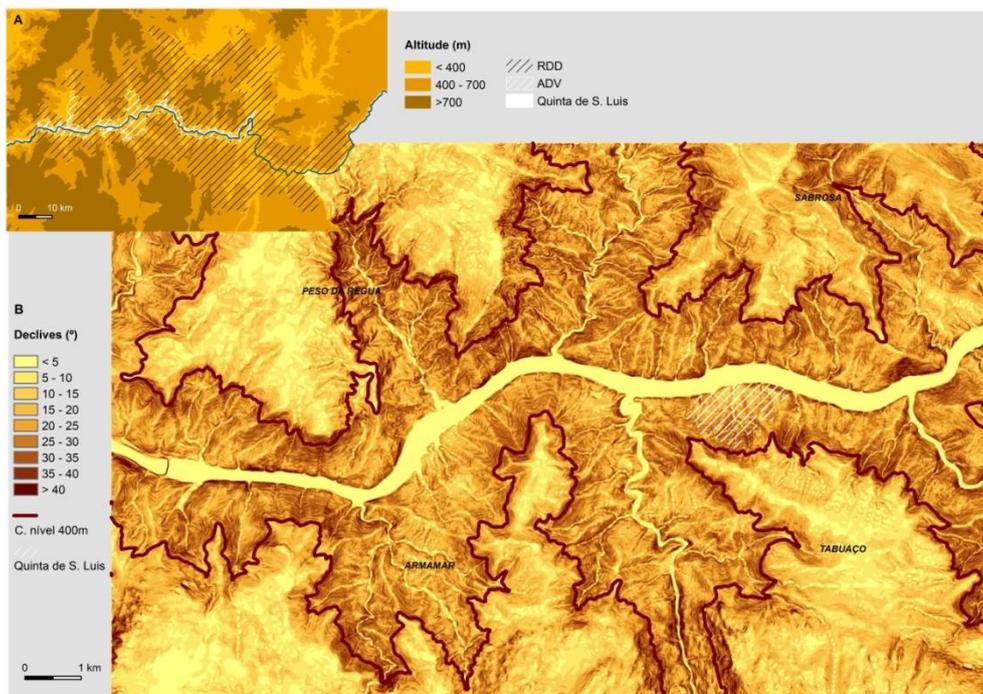


Figura 40 - Hipsometria da RDD e da ADV. B. Declives da área envolvente da Quinta de S. Luiz.

As características morfoestruturais descritas, associam-se a um quadro climático, que elas próprias ajudam a definir, determinando uma paisagem que o uso do solo transformou num espaço de valor cénico, cultural e socio-económico. No seu conjunto, factores de ordem física e humana articulam-se de forma a justificar a classificação do Douro como um dos seis pólos de desenvolvimento em que o país deve apostar, no contexto do *Plano Estratégico Nacional do Turismo* (PENT, 2007).

1.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS E LIMIARES DE PRECIPITAÇÃO

De acordo com a classificação de Daveau (1977, 1988), a RDD insere-se no domínio dos climas mediterrâneos de influência continental, no sub-tipo que designa ‘acentuado pela posição topográfica’ (fig. 41). A sua localização, a oriente dos maciços do Alvão-Marão e Montemuro, determina que esta área seja marcada por valores baixos de precipitação e por temperaturas médias elevadas – que se acentuam para o interior – uma vez que já não sofre a influência das massas de ar atlânticas. Com efeito, o sistema montanhoso referido associado ao forte encaixe da rede hidrográfica, exercem um efeito de barreira à circulação dos ventos húmidos de Oeste, definindo um ‘microclima’ relativamente seco e quente que é determinante na produção de vinhos de elevado teor alcoólico, como é o caso do famoso Vinho do Porto (Pedrosa *et al.*, 2004).

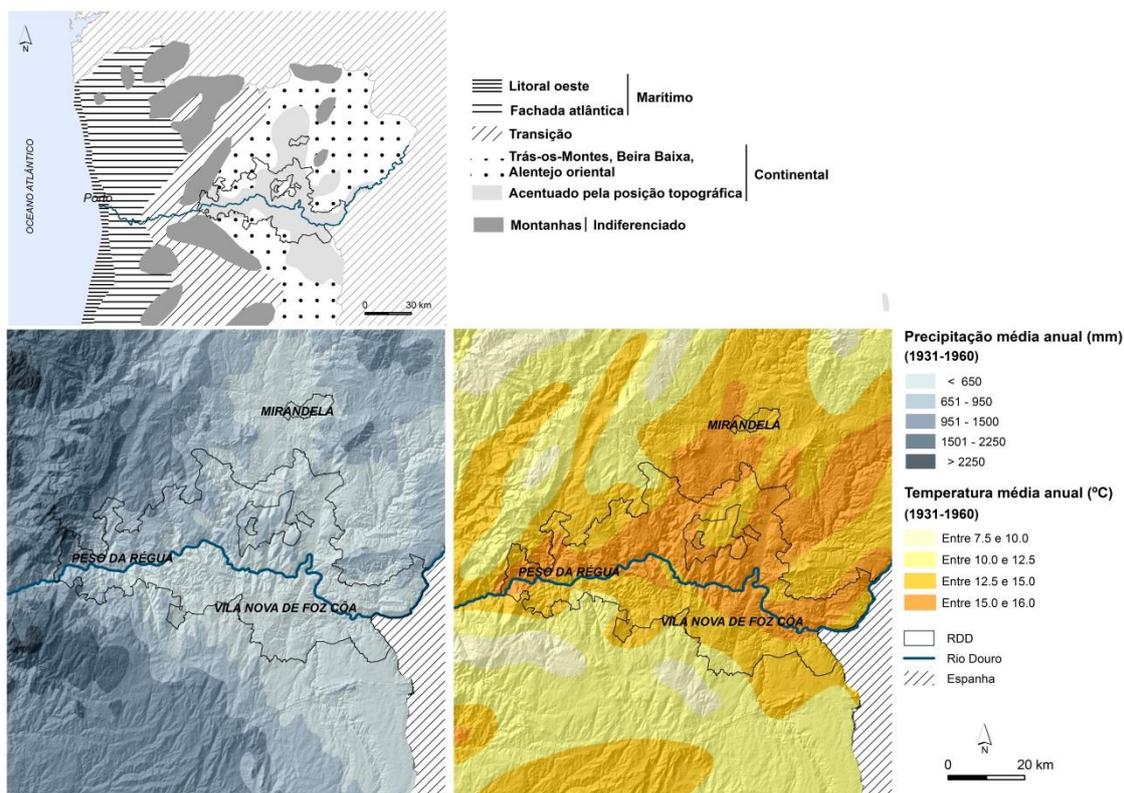


Figura 41 - Enquadramento climático da RDD. Fonte: (Daveau, 1977); (Atlas do Ambiente).

Baseando-nos nos dados da estação meteorológica de Adorigo, a mais próxima da área em estudo, reafirmam-se os baixos valores de precipitação referidos, verificando-se que a média anual corresponde a 686,8mm, apesar de ser possível identificar alguns anos mais pluviosos, designadamente nos anos hídricos de 1997/98 e 2000/01. Ao nível da distribuição mensal (fig. 42), os valores médios mais elevados observam-se nos meses de Outubro, Novembro, Dezembro e Janeiro, que abarcam cerca de 41% do total da média anual. O período de Primavera e Verão representa 31 % deste total, na maior parte das vezes devido a chuvas convectivas que se caracterizam por uma elevada intensidade, frequentemente responsáveis pelo desenvolvimento de ravinamentos.

Com efeito, a RDD é esporadicamente alvo de episódios de precipitação intensa e por vezes prolongada, suscetíveis de desencadear processos de instabilidade hidrogeomorfológica, tal como aconteceu, por exemplo, no Inverno de 2000/2001 (Bateira, 2006), ou ainda este ano (2014) no início do mês de Julho na área do Pinhão.

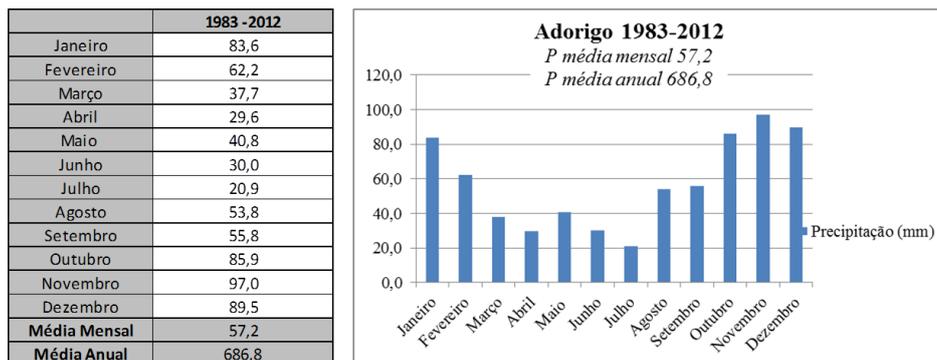


Figura 42 - Precipitação média mensal. Fonte: estação meteorológica de Adorigo, 1982-2012.

Neste contexto, é particularmente importante analisar os valores diários de precipitação, principalmente quando se pretende definir limiares críticos de precipitação para o desencadeamento de processos erosivos e de instabilidade.

No nosso caso, não é possível proceder ao cálculo dos limiares na medida em que apenas foram registadas três ocorrências de intempéries (fig 43). No entanto, com base nos dados da estação de Adorigo e da data de eventos, que motivaram a ocorrência de processos hidrogeomorfológicos na área em estudo (informação cedida pela ADVID), procedemos ao cálculo das precipitações acumuladas, da probabilidade extrema, períodos de retorno e das combinações críticas para a série de dados de 1983-2012 (para 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60, 75, e 90 dias). O período de retorno para cada ocorrência foi obtido segundo a distribuição de Gumbel e com base nos valores extremos de precipitação, determinando-se as combinações críticas com base nos dados de quantidade/duração do período de retorno mais elevado.

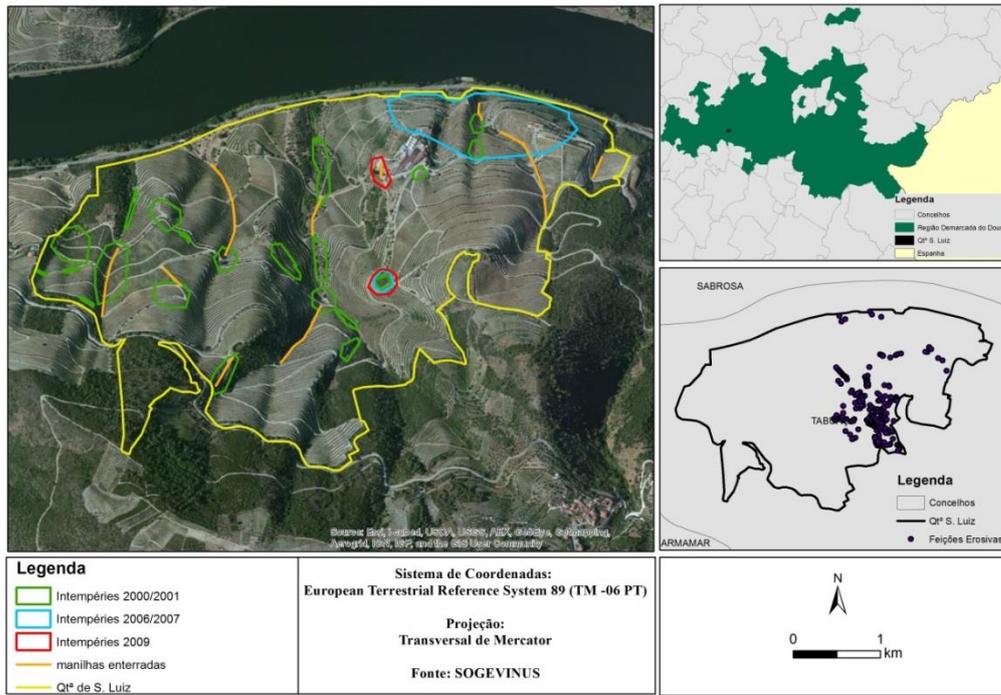


Figura 43 - Intempéries na Qta de S. Luiz

Quadro 5 - Período de retorno e probabilidade extrema associados a eventos de precipitação

08-12-2000	Rmx 1d.	Rmx 2d.	Rmx 3d.	Rmx 4d.	Rmx 5d.	Rmx 10d.	Rmx 15d.	Rmx 30d.	Rmx40dias	Rmx60dias	Rmx75dias	Rmx90dias
Precipitação acumulada	28,20	71,70	103,80	127,00	127,00	167,20	167,20	167,20	273,70	273,70	273,70	273,70
Probabilidade Extrema	0,93	0,33	0,15	0,09	0,16	0,24	0,44	0,71	0,40	0,62	0,69	0,75
Período de Retorno	1,08	3,03	6,74	10,86	6,36	4,11	2,28	1,41	2,48	1,62	1,44	1,34

19-08-2007	Rmx 1d.	Rmx 2d.	Rmx 3d.	Rmx 4d.	Rmx 5d.	Rmx 10d.	Rmx 15d.	Rmx 30d.	Rmx40dias	Rmx60dias	Rmx75dias	Rmx90dias
Precipitação acumulada	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	32,60	61,80	61,80	61,80
Probabilidade Extrema	0,85	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99
Período de Retorno	1,18	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01

07-09-2009	Rmx 1d.	Rmx 2d.	Rmx 3d.	Rmx 4d.	Rmx 5d.	Rmx 10d.	Rmx 15d.	Rmx 30d.
Precipitação acumulada	0,00	0,00	12,80	22,80	22,80	102,00	166,40	225,40
Probabilidade de Ex	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,73	0,44	0,44
Período de Retorno	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,37	2,25	2,27

Combinações Críticas			
EVENTOS	R	dias	Intensidade
			R (mm)/dia
08-12-2000	127	4	31,75
19-08-2007	32,6	1	32,60
07-09-2009	225,4	30	7,51

Analisando as intempéries ocorridas, nas datas de 08-12-2000, 19-08-2007 e 07-09-2009 (quadro 5) os valores revelam que os eventos ocorrem associados a probabilidades extremas com períodos de retorno variados pelo que, é possível deprender que não existe uma tendência a regular para a ocorrência dos mesmos.

Verifica-se que no primeiro e no segundo evento a combinação crítica sucedeu em períodos de tempo bastante diminutos, mais precisamente 4 e 1 dias respetivamente.

Este facto pode ser explicado pela elevada intensidade da precipitação. Por outro lado o evento de 07-09-2009 é o que detêm uma maior quantidade de precipitação absoluta, no entanto aparece associado a 30 dias, com efeito conclui-se que a precipitação acumulada, motivada pela fraca intensidade da mesma, desencadeou o evento.

Admite-se que as características do uso do solo, neste caso a prática agrícola com cultura de vinha em terraços, adquirem extrema importância nos processos erosivos. Assim, a prática agrícola intensiva associada a declives acentuados produz influência direta na perda de solo anual.

Desta forma, faremos uma breve descrição da importância da vinha na área em estudo e a sua disposição seguindo as diferentes tipologias de armação de terreno.

1.2. SOLOS E USO DO SOLO

As características dos solos da RDD, resultam da articulação entre os contextos morfoestrutural e climático descritos, com as intervenções antrópicas que, desde há séculos, moldaram as vertentes desta área.

Efetivamente, tendo em conta a mais recente *World Reference Base for Soil Resources* (FAO, 2014), podemos considerar que as vinhas durienses se desenvolvem sobre antrossolos (*anthrosols*), designação aplicada a solos com longo e intensivo uso agrícola, evidenciando uma forte influência do Homem na sua formação/transformação, quer através da desagregação da rocha-mãe quer através da armação do terreno em socialcos (Pereira, 2000).

De qualquer modo, numa aceção mais tradicional, Ribeiro (2000) considera que no Douro predominam os leptossolos e cambissolos (detríticos na sua maioria), a que se associam fluvisolos nas áreas de fundo de vale e em algumas estreitas várzeas. No entanto, o autor salienta que principalmente os primeiros não permitiam, no seu estado ‘natural’, a implantação da vinha - devido à sua fraca espessura sobre a rocha-mãe que impedia a penetração do sistema radicular das plantas e não detinha capacidade suficiente para armazenar um volume de água considerável – pelo que sofreram alterações significativas.

Essas alterações prendem-se com o uso agrícola dominante na RDD, particularmente a cultura da vinha (fig.43), que determinou a prática das surribas – mobilização profunda/desagregação da rocha e mistura de camadas para ‘criar’ solo - e o desenvolvimento, ao longo do tempo, de diferentes tipos de armação do terreno (fig. 44).

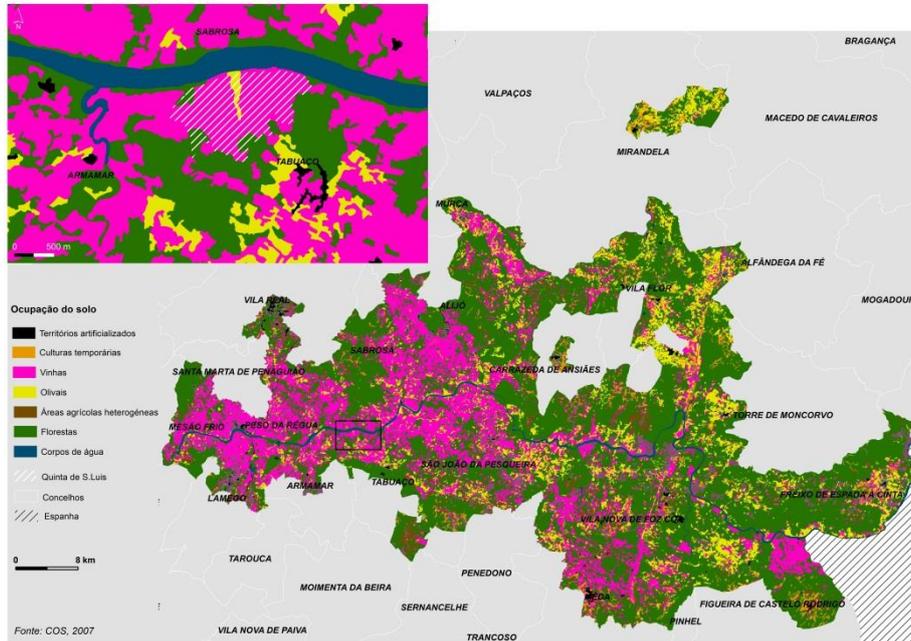


Figura 44 - Ocupação do solo na Região Demarcada do Douro

Com efeito, Fauvrelle (2007, p.88) salienta que as (...) *técnicas de armação das encostas têm variado consoante as épocas, de acordo com um maior ou menor crescimento económico e populacional e com a evolução das tecnologias*. Refere ainda que estas podem ser divididas em dois grupos distintos: as tradicionais ou históricas que se destacam pelo facto de utilizarem muros de suporte de pedra em seco, englobando os socalcos pré e pós-filoxéricos; as mais recentes associadas à mecanização dos trabalhos, designadamente os patamares com taludes de terra - comportando uma ou duas fiadas de vinha – e, principalmente a partir da década de 1980, a designada ‘vinha ao alto’.

A vinha, nos socalcos pré-filoxéricos, encontrava-se disposta em pequenos geios de escassa largura, que comportavam 1 ou 2 bardos e raramente três (Pedrosa *et al.*, 2004). Os muros, mais ou menos distanciados em função do declive da vertente, eram construídos com as pedras retiradas do terreno (Bateira *et al.*, 2011).

Com a crise filoxérica este tipo de armação foi abandonado, uma vez que a vinha americana utilizada como porta-enxertos exigia maior profundidade dos solos. Porém

ainda subsistem marcas da sua existência, não só mantendo a produção ‘original’, mas constituindo os designados ‘mortórios’, ocupados por espécies arbustivas autóctones, ou oliveiras e amendoeiras (Fauvrelle, 2007).

Os novos socalcos pós-filoxéricos, caracterizados por uma menor quantidade de muros, mais altos e largos, permitiam a plantação de mais pés de vinha alinhados pelas curvas de nível. No entanto, as plataformas de cultivo apresentam normalmente maior inclinação, sendo ligadas por escadas e rampas (Sousa *et al.*, s/d). A partir das décadas de 1960 e 1970, a escassez de mão-de-obra torna urgente a mecanização das propriedades. Nesse sentido, assiste-se a acentuadas mudanças na técnica de surribar. Neste sentido, constroem-se patamares com taludes em terra, sem muros de xisto (Seixas *et al.*, 2006). Cada patamar possui uma altura variável em função do declive natural da vertente, comportando uma ou duas fiadas de vinha aramada com esteios, de xisto ou madeira (Fauvrelle, *ob.cit*). Segundo Magalhães (2012), para declives superiores a 20% os patamares não devem comportar mais de dois bardos, sendo que a largura dos terraços não deverá exceder os 3,8 a 4 m.

A partir dos anos 80 do século XX, aparece uma nova forma de armação do terreno: vinhas plantadas segundo a linha de maior declive (Seixas *et al.*, 2006). Este sistema de ‘vinha ao alto’ dispõe-se segundo linhas perpendiculares às curvas de nível, separadas por estradas de acesso (Bateira *et al.*, 2011). No entanto, só pode ser utilizado em encostas com declive inicial inferior a 30%, restringindo-se normalmente às áreas de topo aplanado ou rechãs (Resolução do Conselho de Ministros 150/2003 de 22 de Setembro e Despacho Conjunto 473/2004 de 30 de Junho).

Assim, particularizando para a nossa área de estudo, vislumbra-se que a Qt^a de S. Luiz, com o total de 127,27 ha, detêm a maior parte da sua área ocupada por vinha, cerca de 69,5 %, (fig. 45; Quadro 6).

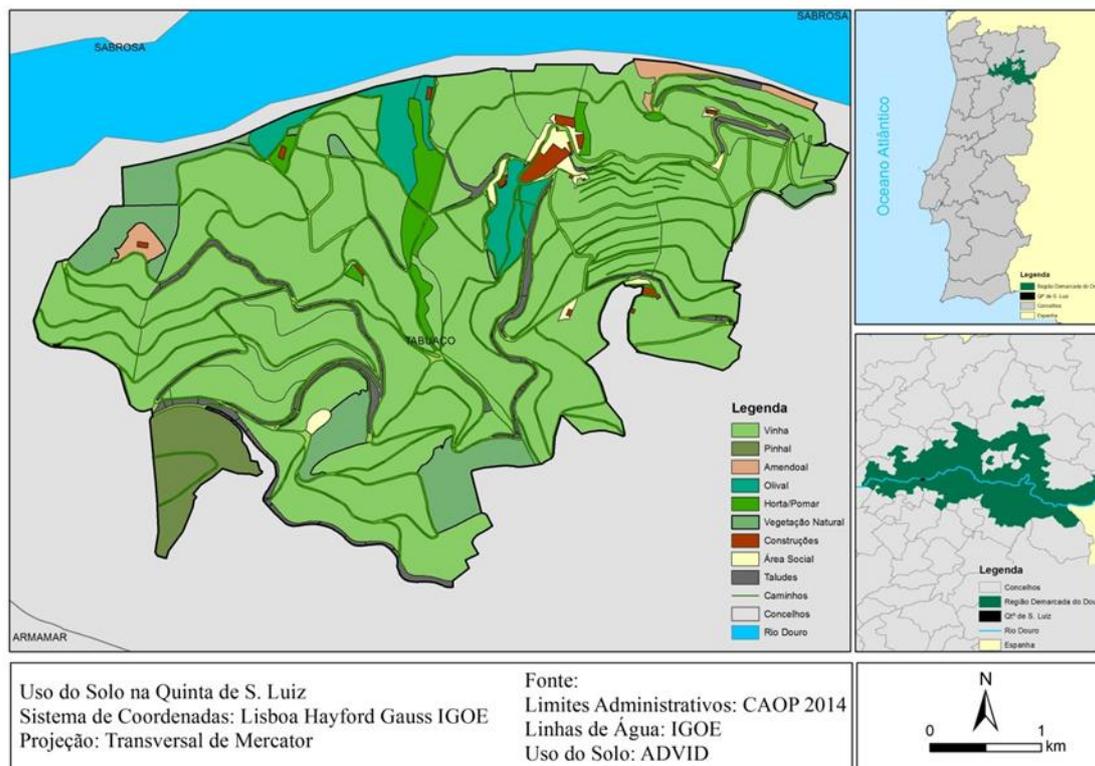


Figura 45 - Uso do Solo na Qtª de S. Luiz

Quadro 6 - Percentagem de ocupação de Uso do Solo

Designação	Área (ha)	%
Vinha	88,95	69,5
Olival	5,28	4,1
Amendoal	1,15	0,9
Horta/Pomar	2,82	2,2
Vegetação Natural	8,94	7,0
Pinhal	4,27	3,3
Muros	0,25	0,2
Taludes	2,94	2,3
Caminhos	11,41	8,9
Construções	0,83	0,6
Área Social	1,18	0,9
Área Total	127,97	100

No que se refere aos sistemas de armação de terreno, verifica-se que predomina a vinha em patamar, que ocupa mais de 50% da área ocupada por vinha, seguindo-se a vinha ao alto, que ocupa cerca de 18,5 %. Este facto deve-se sobretudo aos elevados declives das áreas em questão.

Os restantes sistemas de armação identificados surgem de forma esporádica, de modo que não exercem grande influência no panorama geral, (fig. 46; Quadro 7).

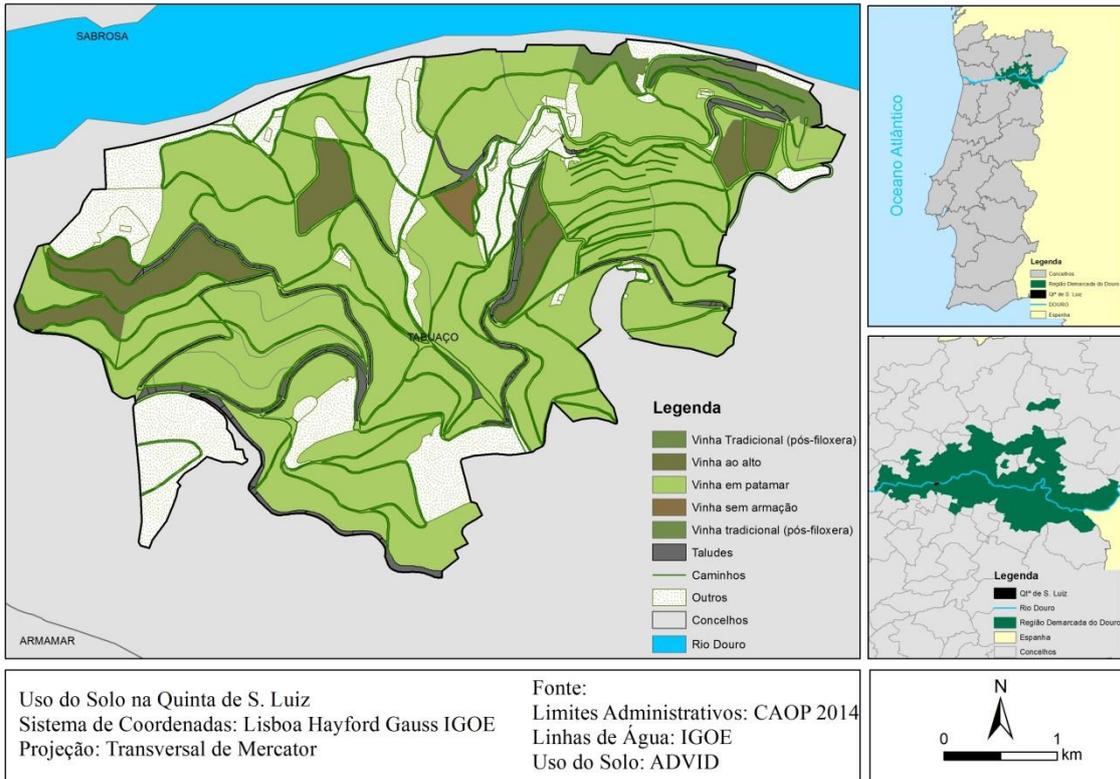


Figura 46 - Sistemas de armação de terreno na Q^{ta} de S. Luiz.

Quadro 7 - Percentagem de ocupação de sistemas de armação de terreno.

Designação	Área (%)
Vinha em patamar	54,6
Vinha ao alto	18,5
Vinha tradicional (pós-filoxera)	15,5
vinha sem armação	11,3
Área total de vinha	88,95 (ha)

CAPÍTULO IV - MODELAÇÃO E CARTOGRAFIA DOS PROCESSOS

1. INVENTARIAÇÃO DAS FEIÇÕES EROSIVAS NA QUINTA DE S. LUIZ

Decorrente do levantamento de campo na área em estudo, foi possível avaliar o panorama geral relativamente à tipologia dos processos erosivos predominantes, sendo identificadas 219 feições erosivas (fig. 47).

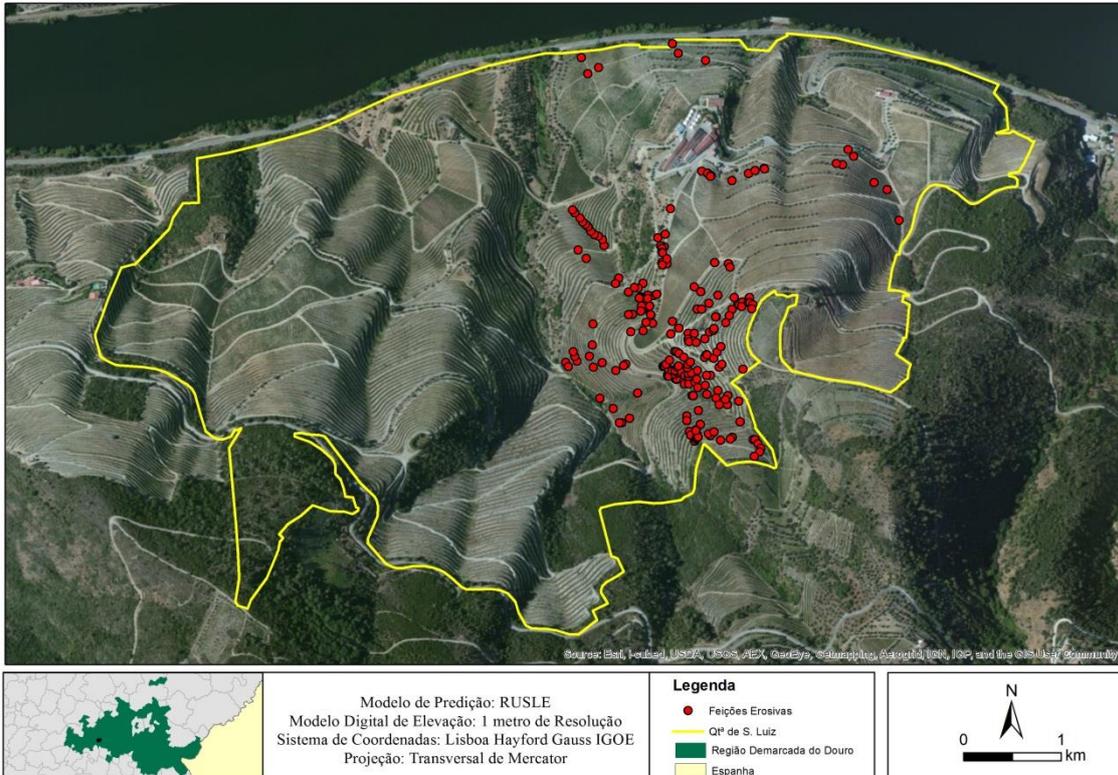


Figura 47 - Inventário de feições erosivas na Quinta de S. Luiz.

Estas feições correspondem sobretudo a processos lineares, nomeadamente ravinas e sulcos, verificando-se que a erosão laminar é irrelevante ou inexistente.

Desta forma, os processos de escorrência concentrada exercem mais influência na dinâmica erosiva da área em estudo, registando-se, de forma isolada, 115 ravinas e 56 sulcos. Não obstante, foram também identificados 21 taludes com feições simultâneas de sulcos e ravinas e 27 taludes com um padrão constante composto por sulcos (fig. 48).

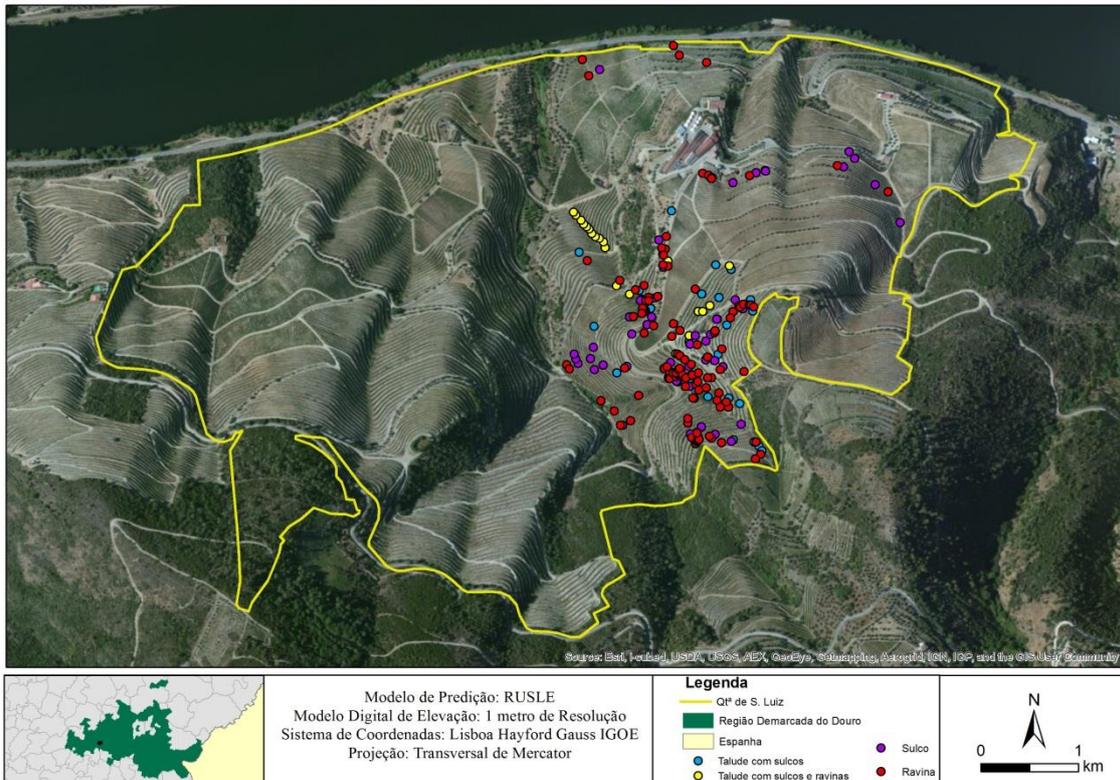


Figura 48 - Tipologia das feições erosivas na Quinta de S. Luiz.

Justifica-se assim, como referimos no segundo capítulo, a aplicação dos dois modelos seleccionados, considerando que a (R)USLE é direccionada para a erosão em sulcos, enquanto o SIMWE é indicado para a erosão em ravinas.

2. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA (R)USLE NA QUINTA DE S. LUIZ

Neste ponto expõe-se os resultados obtidos no cálculo de cada fator da (R)USLE, que surgem sob o formato de um único valor ou em imagem *raster*. Como salientado, apresenta-se também um estudo comparativo da aplicação do modelo considerando diferentes algoritmos de cálculo do fator LS.

2.1. FATOR EROSIVIDADE (R)

Vimos que os resultados obtidos para este fator têm por base os dados diários de precipitação das estações de Adorigo e Vale da Figueira, constituindo uma série que abrange o período de 1983 a 2012.

Assim sendo, seguindo a metodologia apresentada por Bertoni & Lombardi e Neto (1995) procedeu-se ao cálculo da média mensal e anual, do índice de

erosividade e posteriormente do fator R, que resultou num valor único dada a escala de detalhe da área em estudo (Quadro 8).

Assim, a área em estudo apresenta um índice de erosão de 10,3 (MJ/ha mm), traduzindo-se num fator R de 124 (MJ/ha - mm/ano), valor similar obtido por outros autores face a valores médios similares de precipitação (i.e. Simões, 2013), sendo ainda concordante com o Mapa da Erosividade da Precipitação em Portugal (SNIRH, 2009).

Quadro 8 - Precipitação média mensal e anual da série de precipitação entre 1983-2012, média mensal do índice de erosão e fator de erosividade.

Adorigo	Precipitação Média anual	EI (MJ/ha mm)	R (MJ/ha - mm/ano)
	686,8	10,3	124,1

2.2. FATOR ERODIBILIDADE (K)

Os resultados obtidos para este fator, tal como explicado no capítulo II, advieram da determinação das classes texturais, em laboratório, segundo a classificação de Folk (1954) onde posteriormente procedemos à agregação das características texturais segundo a aplicação da metodologia de Wischmeier & Smith (1978), salientando, mais uma vez, que procedemos à agregação dos resultados texturais para as diferentes amostras de solo, por se tratar de uma área com apenas um tipo de solo.

Da análise efetuada, (fig. 49.) verifica-se a existência de uma percentagem de finos bastante elevada, sobretudo a percentagem de argila, bem como o do teor de matéria orgânica, facto que pode ser explicado pela elevada percentagem de xisto na área em estudo.

Posteriormente, seguindo o nomograma de Wischmeier & Smith (1978) foi possível identificar, na generalidade o solo possui uma estrutura compacta com permeabilidade lenta.

Conclui-se que os resultados do fator K são bastante diminutos relativamente à escala K estabelecida, que varia entre 0 e 0,10 unidades SI devido sobretudo à forte presença de xisto na Qt^a de S. Luiz, associada à cultura da vinha.

Características	Litossolos associados a Luvisolos
Areia grossa 0,1-2	28,52
Areia Fina 0,05-0,1	8,53
Limo 0,002 - 0,05	6,43
Argila 0-0,002	51,34
MO%	5,18
Estrutura	3,00
Permeabilidade	5,00
K (SI)	0,014
K (métricas)	0,141

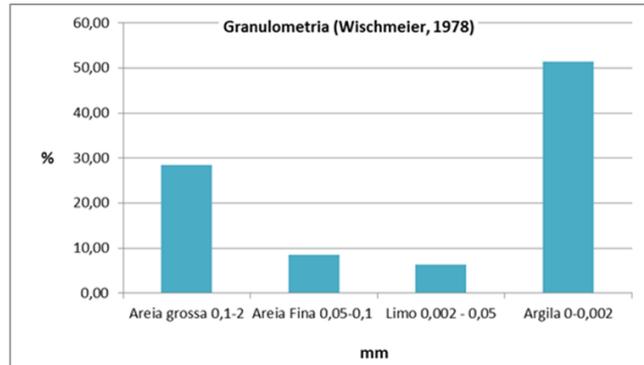


Figura 49 - Características físicas do solo da área de estudo e determinação do fator K.

2.3. FATOR TOPOGRÁFICO (LS)

Referimos que a obtenção deste fator envolveu o cálculo de diferentes algoritmos em *softwares* distintos, de forma a determinar qual se adequa mais à realidade e a influência de cada um deles no cálculo da erosão hídrica potencial e erosão hídrica real (fig.50).

A metodologia de Engel *et al.* (1991) e de Mitasova *et al.* (1996), obtidas no software ArcGis, demonstram não ilustrar de forma adequada a configuração do terreno da área em estudo. Por outro lado, os fatores calculados segundo as metodologias de Moore *et al.* (1991), Böhner & Selige (2006) e Desmet & Govers (1996), no software SAGA GIS, revelam resultados mais apropriados, na medida em que traduzem a organização em socalcos bem como se coadunam com os valores apresentados no mapa de declives.

Por conseguinte, analisando as três metodologias referidas com valores mais adequados, verifica-se que as áreas que denotam valores menores possuem uma orientação Norte e Nordeste, associadas também a fundos de vale e a vertentes côncavas e retilíneas (fig.51). Contrariamente as que revelam valores mais elevados localizam-se na sua generalidade em vertentes convexas com orientação Noroeste, Oeste, Sudoeste e Sudeste. Estes valores explicam-se também pelos valores de declive elevados.

Por fim, as restantes metodologias apresentam na sua totalidade valores muito diminutos, não traduzindo de forma real o comprimento e inclinação das vertentes na área de estudo.

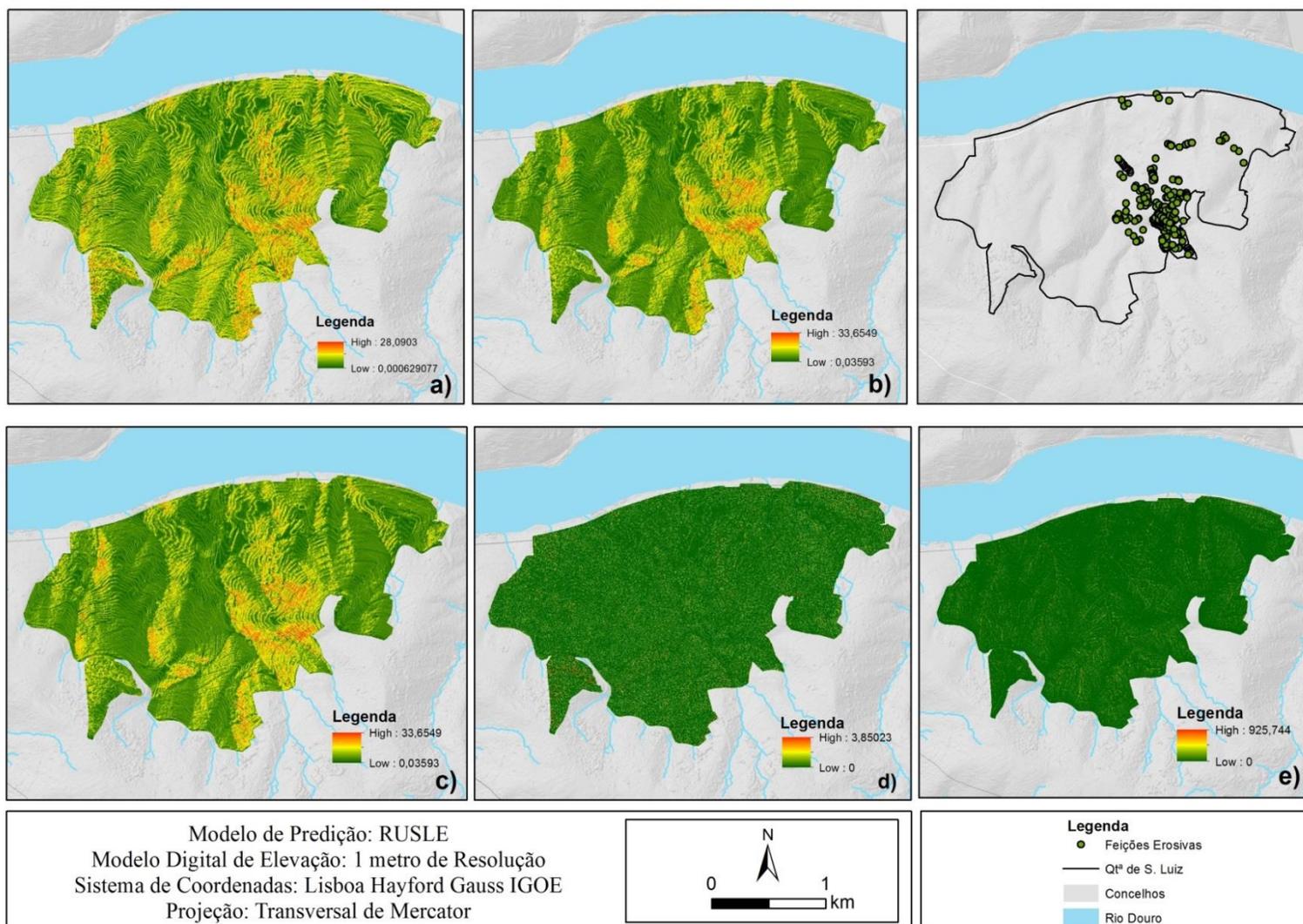


Figura 50 - Fator LS calculado com cinco algoritmos diferentes: a) Moore (1991); b) Böhner&Selige (2006); c) Desmet&Govers (1996); d) Engel et al. (1991); e) Mitasova et al. (1996).

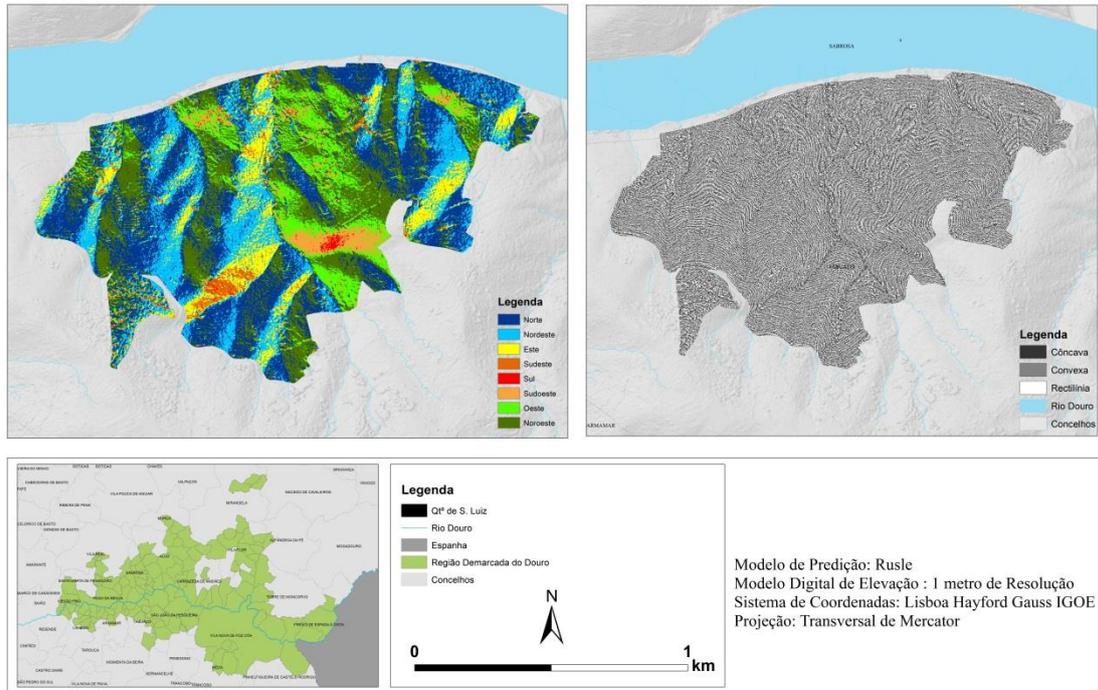


Figura 51 - Exposições e Curvatura.

2.4. FATOR COBERTURA DO SOLO (C)

A identificação deste fator foi elaborada com base no reconhecimento de campo da área em estudo bem como com recurso a imagens aéreas obtidas por uma aeronave, com pixel de 50 cm.

Posteriormente este fator foi cartografado no software ArcGis, seguindo as diretrizes estabelecidas por Tomás (1993) e Pimenta (1998a).

Advoga-se que as áreas que denotam valores mais elevados relacionam-se com a prática de agricultura intensiva, nomeadamente à cultura da vinha. Posteriormente o valor intermédio revela áreas de floresta, amendoal ou pinhal, ou seja áreas onde o efeito de proteção da vegetação é notório.

Por fim, o valor mais reduzido ilustra áreas urbanizadas (fig. 52).

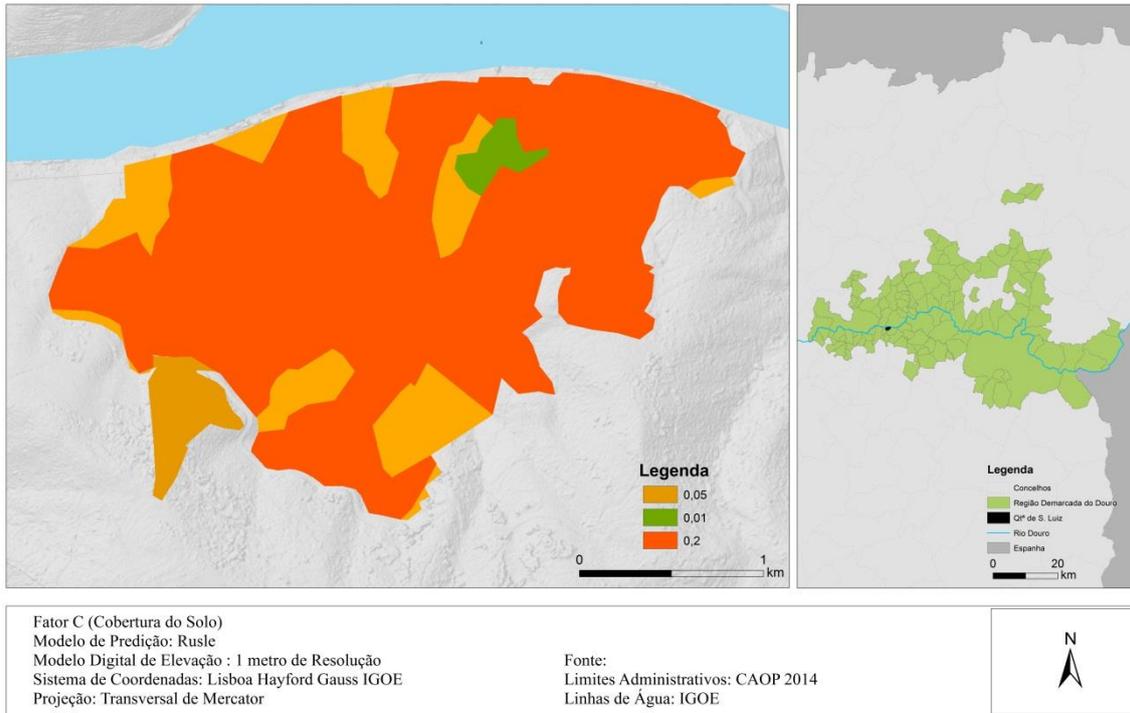


Figura 52 - Fator Coberto do Solo (C).

2.5. FATOR PRÁTICA AGRÍCOLA (P)

O fator P foi obtido seguindo as diretrizes de Tomás (1993) com recurso ao software ArcGis 10.2.

Com efeito, utilizaram-se os valores para a cultura em terraços em função do declive, em percentagem.

Decorrente deste procedimento verifica-se que a área em estudo revela valores do fator P bastante elevados (fig.53), facto que pode ser explicado pelos declives acentuados na generalidade da Qtª de S. Luiz (fig. 54). Da mesma forma, os valores mais reduzidos de P localizam-se em áreas de menor declive.

Conclui-se assim que, embora a cultura praticada seja em terraços, os valores de P apresentam-se bastante elevados na medida em que se coadunam com valores de declividade igualmente altos.

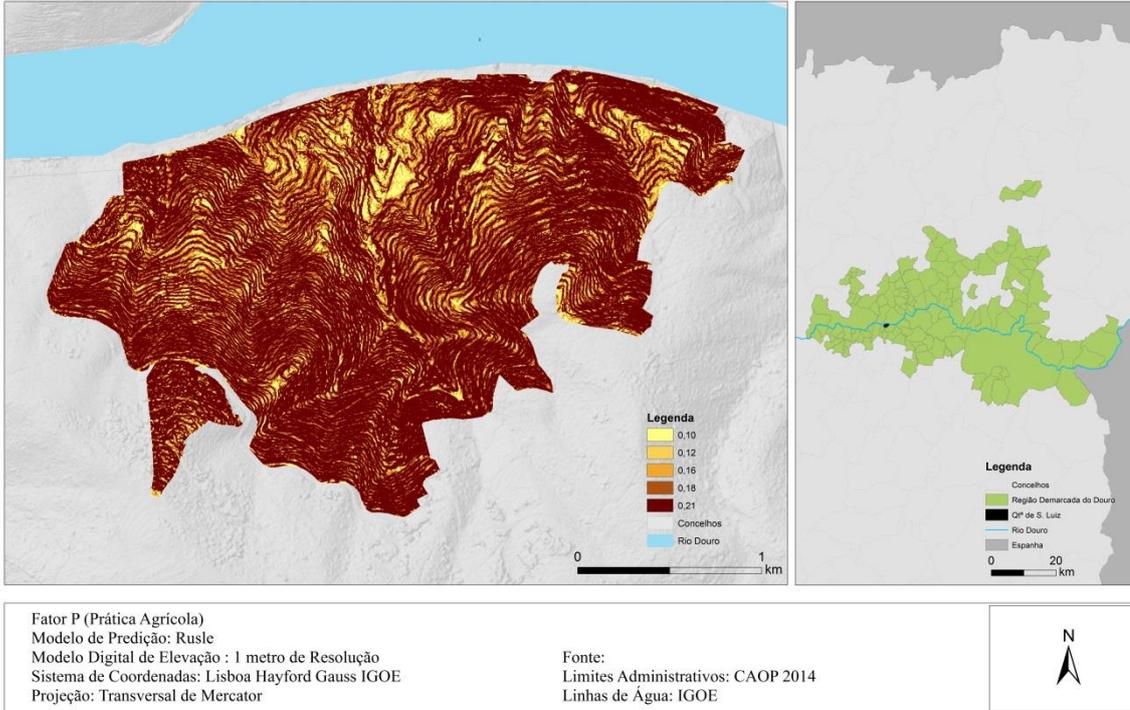


Figura 53 - Fator P na Qt^a de S. Luiz.

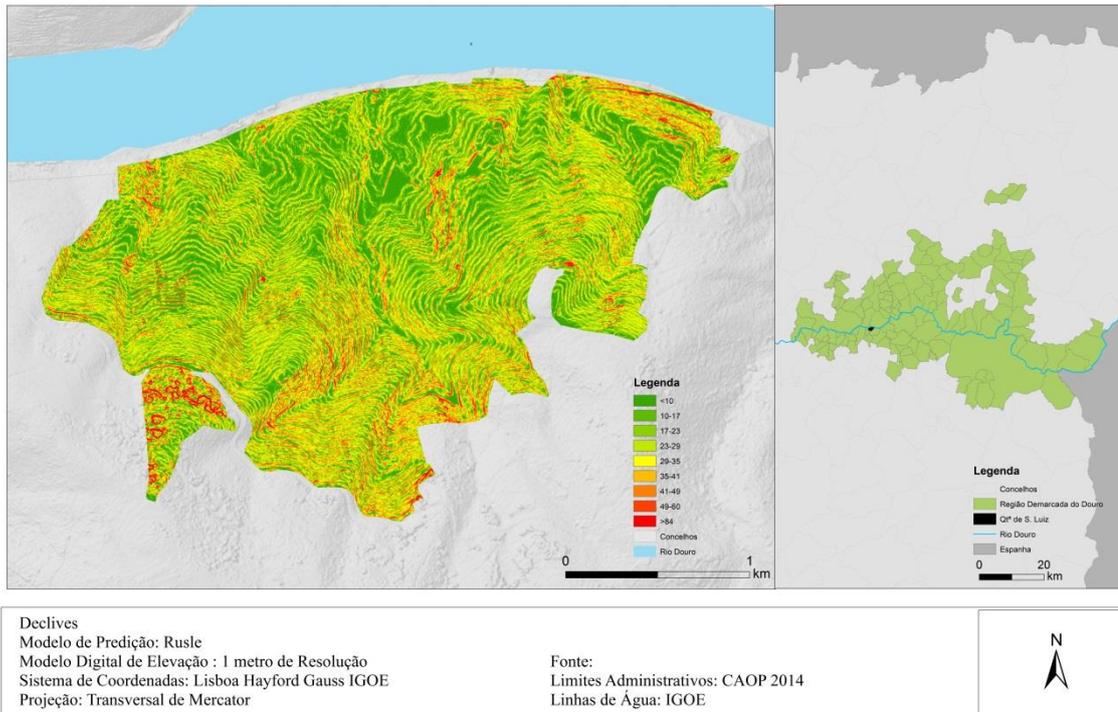


Figura 54 - Declives da Qt^a de S. Luiz.

2.5.1. EROSÃO HÍDRICA POTENCIAL

Na erosão hídrica potencial determina-se a perda de solo rejeitando-se os fatores que se apresentam variáveis no tempo, ou seja fatores C e P, na medida em que estes não são permanentes, devido à influência antrópica.

Neste sentido consideram-se apenas os fatores R, K e LS, o que significa que a erosão hídrica potencial depende unicamente de características relacionadas com a precipitação (erosividade), topografia (LS) e atributos físicos do solo (erodibilidade).

Por conseguinte, efetuou-se o cálculo destes fatores no *software* ArcGis 10.2 considerando os diferentes algoritmos do fator LS, resultando em 5 mapas em formato raster que posteriormente foi reclassificado em quatro classes (definidas pela quebra natural dos valores obtidos), para a determinação das áreas mais suscetíveis à erosão hídrica potencial na Quinta de S. Luiz (fig.55; Quadro 9).

A partir destes procedimentos consideramos que o cálculo da erosão potencial para os algoritmos de Engel *et al.* (1991) e Mitasova *et al.* (1996) não se adequam à realidade observada *in situ*, considerando a maior parte de área em estudo com a classe de suscetibilidade nula. Outro dos aspetos a salientar é que os algoritmos de Böhner & Selige (2006) e Desmet & Govers (1996) apresentam resultados iguais.

Neste sentido, analisando os resultados obtidos com os três primeiros algoritmos do fator LS, verifica-se que na generalidade as classes de suscetibilidade baixa e nula apresentam valores mais elevados. Por outro lado, as classes de suscetibilidade moderada e elevada localizam-se em vertentes convexas com orientação generalizada para Oeste e Noroeste, associando-se também às áreas onde o declive e o comprimento das vertentes apresentam valores mais elevados.

Verifica-se, desta forma, que o fator LS exerce uma forte influência nos valores de erosão hídrica potencial. Os fatores R e K revelam extrema importância, na medida em que nas vertentes onde a altitude é mais acentuada os valores de precipitação são mais elevados, por outro lado quando associadas a um maior declive o fluxo superficial é mais acentuado e por conseguinte o nível de matéria orgânica é diminuído.

Conclui-se que esta metodologia revela indicações preponderantes, em termos de planeamento do uso do solo, na área em estudo, levando ao repensar sobretudo do coberto vegetal implementado em cada sector, visto que a prática agrícola é homogénea e dificilmente contornável.

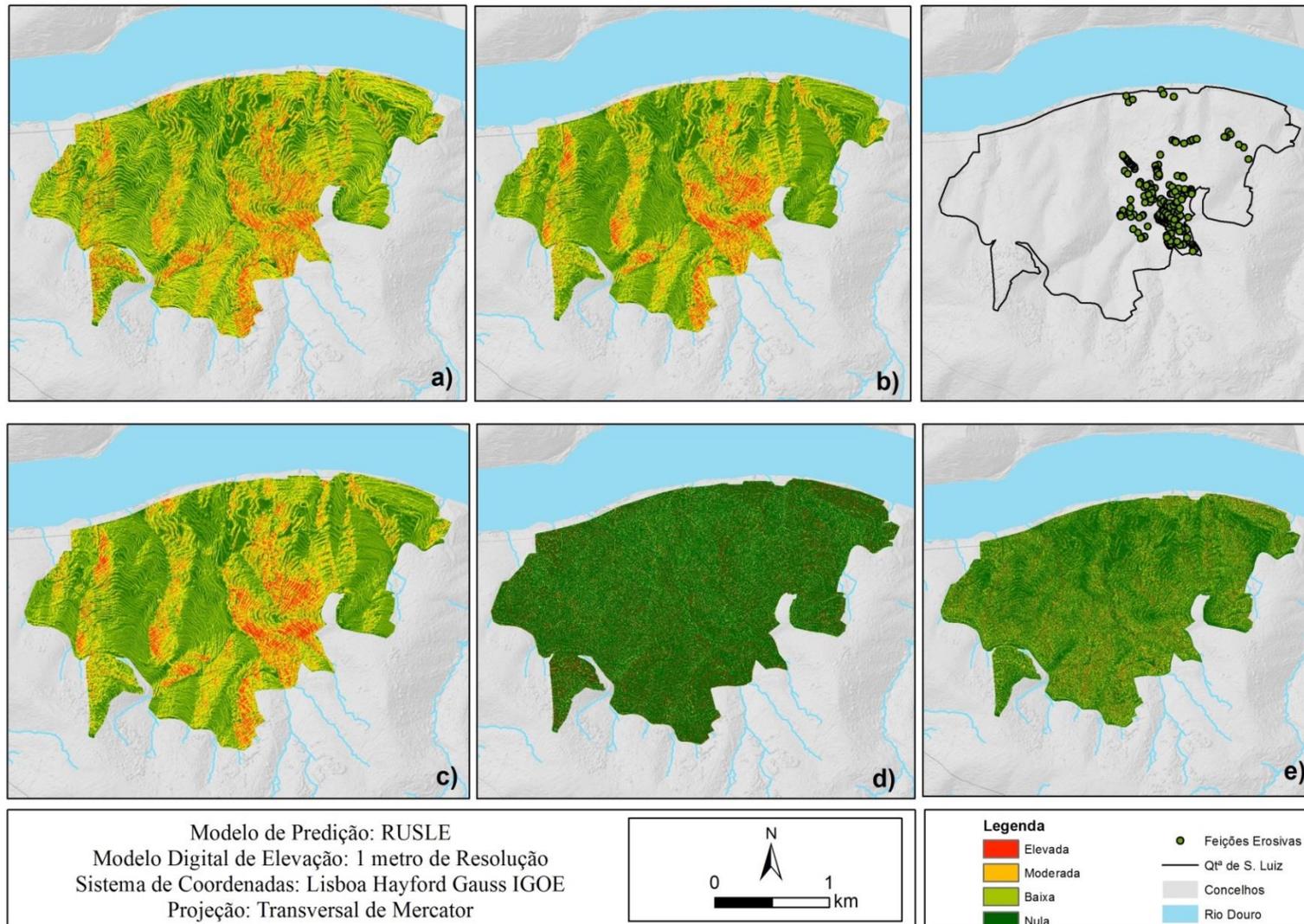


Figura 55 - Erosão Potencial na Qtª de S. Luiz segundo diferentes algoritmos de LS: a) Moore (1991); b) Böhner & Selige (2006); c) Desmet & Govers (1996); Engel et al. (1991); Mitsova et al. (1996).

Quadro 10 - Percentagem da Erosão Potencial segundo cinco algoritmos, considerando a área total da Qt^a de S.Luiz (127,97 ha).

Erosão Potencial (%)	Moore <i>et al.</i> (1991)	Böhner & Selige (2006)	Desmet & Govers (1996)	Engel <i>et al.</i> (1991)	Mitasova <i>et al.</i> (1996)
Elevada	6,5	3,7	3,7	2,7	0,2
Moderada	18,9	14,5	14,5	7,5	2,1
Baixa	37,4	34,1	34,1	8,5	15,7
Nula	37,2	47,7	47,7	81,3	82,0

Analisando o inventário de feições erosivas, (Quadro 9), confirma-se que, em todos os modelos, a classe de suscetibilidade moderada contempla o maior número de registos de feições erosivas, o inverso acontece na classe de suscetibilidade nula. O modelo segundo o algoritmo de Engel *et al.* (1991) considera a classe de suscetibilidade moderada como sendo a que integra o maior número de registos. Outra das dissemelhanças prende-se com o facto do modelo de Mitasova *et al.* (1996) não incluir nenhuma feição erosiva na classe de suscetibilidade baixa. Mais uma vez considera-se que os dois últimos modelos não contemplam fiabilidade face à realidade observada *in situ*, (Quadro 10).

Quadro 9 - Percentagem de feições erosivas por classe de suscetibilidade.

Classe	Moore <i>et al.</i> (1991)	Böhner & Selige (2006)	Desmet & Govers (1996)	Engel <i>et al.</i> (1991)	Mitasova <i>et al.</i> (1996)
Feições Erosivas					
1	2	2	2	2	2
2	67	72	64	24	0
3	87	88	81	180	67
4	62	56	71	12	149

2.5.2. EROSÃO HÍDRICA REAL - (R)USLE

Para o cálculo da erosão hídrica real, em que se utilizam todos os parâmetros da (R)USLE, consideramos igualmente os diferentes algoritmos do fator LS, mais uma vez com recurso software ArcGis 10.2 e procedendo à reclassificação dos resultados em quatro classes. Decorrente desta análise observa-se que a determinação deste modelo, com diferentes algoritmos do fator LS, difere bastante, concluindo-se assim que os modelos resultantes do algoritmo de Engel *et al.* (1991) e Wischmeier & Smith (1978) não se adequam ao estudo de erosão na área em estudo.

Assim, vislumbra-se que para os modelos calculados, com os restantes algoritmos, a perda de solo real anual com classes de suscetibilidade elevada localizam-se sobretudo em vertentes convexas com orientação Noroeste e Oeste. Para além desta associação destaca-se ainda que esta classe está aliada a vertentes com um forte declive e um longo comprimento. Em contraponto, as áreas onde a perda de solo é menos evidente

localizam-se onde o coberto vegetal exerce influência direta e onde a declividade e o comprimento das vertentes obtêm valores menores, (fig. 56).

Nos cinco algoritmos calculados verifica-se que a classe de suscetibilidade elevada é a que ocupa menor percentagem de área, prevalecendo a maior percentagem de ocupação na classe de suscetibilidade nula, (Quadro 11).

Na generalidade a classe de suscetibilidade elevada é a que apresenta menores registos de feições erosivas, com exceção dos últimos algoritmos, uma vez que para a generalidade da área não se prevê erosão, (Quadro 12).

Comparativamente com os valores médios obtidos para a erosão potencial verifica-se que estes valores são bastante menores relativamente aos valores de erosão real, depreendendo deste facto que os fatores C e P exercem uma influência considerável na perda de solo anual (Quadro 13).

Quadro 11 - Percentagem de Erosão Real segundo cinco algoritmos, considerando a área total da Qtª de S.Luiz (127.97 ha).

Erosão Real - (R)USLE (%)	Moore <i>et al.</i> (1991)	Böhner & Selige (2006)	Desmet & Govers (1996)	Engel <i>et al.</i> (1991)	Mitasova <i>et al.</i> (1996)
Elevada	5,3	3,6	3,7	1,9	0,1
Moderada	16,2	13,0	14,5	4,4	2,1
Baixa	29,8	38,6	34,1	8,0	19,0
Nula	48,7	44,8	47,7	85,8	78,7

Quadro 12 - Percentagem de feições erosivas por classe de suscetibilidade.

Classe	Moore <i>et al.</i> (1991)	Böhner & Selige (2006)	Desmet & Govers (1996)	Engel <i>et al.</i> (1991)	Mitasova <i>et al.</i> (1996)
Feições Erosivas					
Nula	54	38	38	196	162
Baixa	74	72	72	10	53
Moderada	49	78	78	12	3
Elevada	42	31	31	1	1

Quadro 13 - Comparação entre a Erosão Hídrica Real e Potencial em ton.ha⁻¹. ano⁻¹.

Erosão Real ton.ha ⁻¹ . ano ⁻¹	Moore <i>et al.</i> (1991)	Böhner & Selige (2006)	Desmet & Govers (1996)	Engel <i>et al.</i> (1991)	Mitasova <i>et al.</i> (1996)
Média	117.146	77.106	77.055	5.208	4.830

Erosão Potencial ton.ha ⁻¹ . ano ⁻¹	Moore <i>et al.</i> (1991)	Böhner & Selige (2006)	Desmet & Govers (1996)	Engel <i>et al.</i> (1991)	Mitasova <i>et al.</i> (1996)
Média	7673,000	5161,000	5168,000	366,000	316,56

Decorrente desta análise é possível identificar áreas que revelam prioridade de intervenção, de forma a diminuir a suscetibilidade ao risco de erosão. Assim, medidas de redução da declividade e comprimento das vertentes, e a implementação de um coberto vegetal mais eficaz, seriam uma das soluções que poderiam levar à diminuição da perda de solo anual da área em estudo. O número de feições erosivas, associadas à classe de suscetibilidade alta apresenta-se menor na erosão real que na erosão potencial visto esta deter uma percentagem maior da área com suscetibilidade mais elevada.

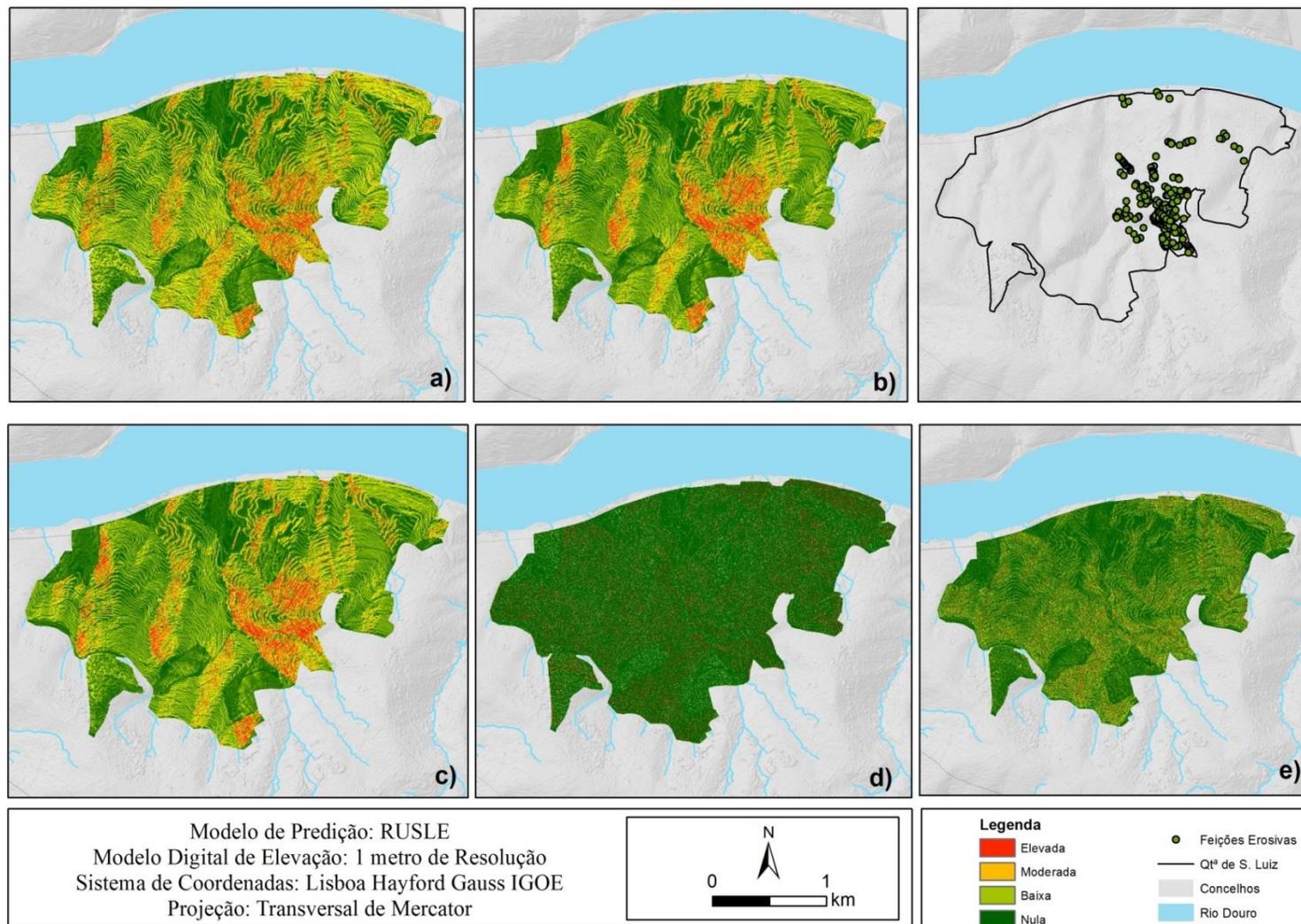


Figura 56 - Erosão Real na Qt^a de S. Luiz segundo diferentes algoritmos do fator LS: a) Moore (1991); Böhner & Selige (2006); Desmet & Govers (1996); Engel et al. (1996); Mitasova et al. (1996).

2.6. REGRESSÃO LOGÍSTICA

Para estimar a probabilidade de perda de solo anual por erosão hídrica na Quinta de S. Luiz, recorreremos à aplicação do modelo de predição de regressão logística binária, com recurso aos softwares SPSS e ao ArcGIS.

Assim, consideramos os resultados obtidos na erosão real com os diferentes algoritmos de cálculo do fator LS, incluindo apenas para análise os fatores C, P e LS. Esta escolha decaiu por considerarmos que estes são os fatores que exercem mais impacto no resultado final deste modelo. Desta forma, pretendemos demonstrar o efeito destes fatores na qualidade global do modelo da RUSLE segundo os diferentes algoritmos de LS. Para o efeito apresentamos os valores dos coeficientes (Quadro 14).

Quadro 14 - Coeficientes de regressão logística da (R)USLE.

Rusle com diferentes algoritmos do LS	Intercepção de Y	Fator P	Fator C	LS
Moore <i>et al.</i> (1991)	-6,642	-3,822	26,787	0,298
Böhner & Selige (2006)	-6,948	0,658	28,19	0,161
Desmet & Govers (1996)	-7,257	-0,188	25,897	0,436
Engel <i>et al.</i> (1991)	-6,971	11,995	21,388	0,06
Mitasova <i>et al.</i> (1996)	-6,918	11,358	21,433	0,000

Ressalta-se que os coeficientes de regressão traduzem o impacto de cada variável independente no modelo final. Por conseguinte os valores dos coeficientes superiores a 1, apresentados no quadro 13, refletem o risco dessa variável influenciar o modelo final, por outro lado as variáveis que apresentam valores inferiores a 1 indicam o risco inverso. Ao analisar o quadro 15, verifica-se que o fator P é o que exerce um menor contributo na suscetibilidade e no resultado final do modelo de predição segundo os algoritmos de LS de Moore *et al.* (1991) e Desmet & Govers (1996). Por outro lado, nos restantes modelos, é precisamente o fator LS que exerce menor influência, revelando não ser o fator preponderante na avaliação das suscetibilidade.

Em todos os modelos calculados verifica-se que o fator C é o que detêm mais importância na avaliação da suscetibilidade à perda de solo. Posteriormente, procedemos à aplicação da equação do modelo, no software ArcGIS através da qual foi possível combinar os valores de coeficientes dos fatores analisados, culminando assim no mapa final de probabilidade de ocorrência, (fig. 57).

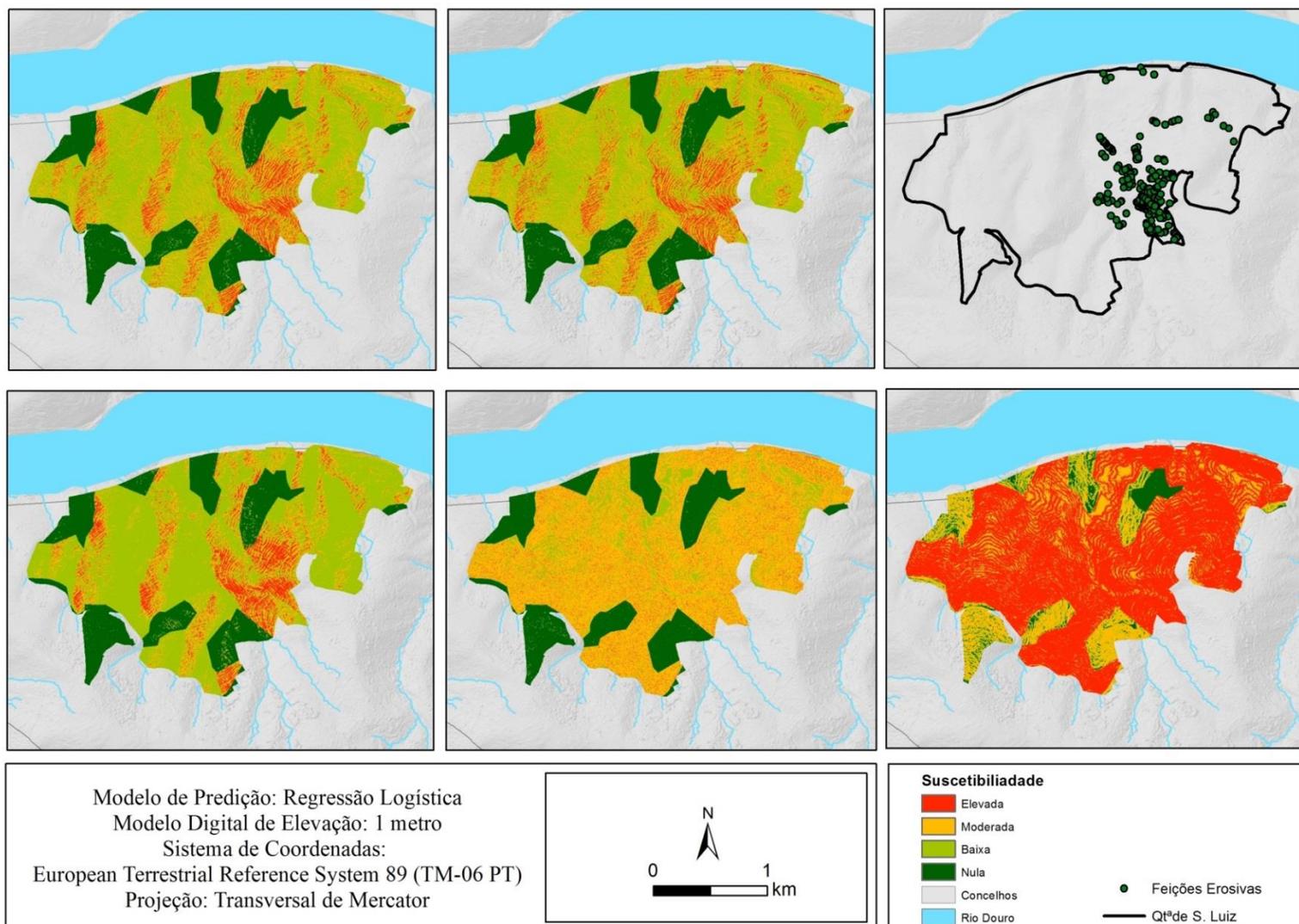


Figura 57 - Regressão Logística aplicada à RUSLE na Quinta de S. Luiz segundo diferentes algoritmos do fator LS: a) Moore (1991); b) Böhner & Selige (2006); c) Desmet & Govers (1996); d) Engel et al. (1991); e) Mitsova et al. (1996).

Quadro 15 - Percentagem de perda de solo anual por classe de suscetibilidade com o modelo de Regressão Logística.

(R)usle com diferentes algoritmos do LS (%)	Moore (1991)	Böner & Selige (2006)	Desmet & Govers (1996)	Engel et al. (1991)	Mitasova et al. (1996)
Elevada	9,23	9,67	8,19	19,62	52,48
Moderada	23,09	24,82	16,39	13,55	27,76
Baixa	48,26	46,07	56,21	60,82	12,43
Nula	19,42	19,43	19,22	6,01	7,34

Desta forma, é possível observar uma grande porção de áreas onde a probabilidade de ocorrência de erosão é baixa e moderada, seguindo-se em número mais reduzido a quantidade de áreas onde a probabilidade é elevada ou nula.

Salienta-se que a perda de solo, segundo o algoritmo de Mitasova et al. (1996) apresenta valores desadequados, na medida em que classifica a maioria 52,48% da área com uma classe de suscetibilidade elevada. Por outro lado, segundo o algoritmo de Engel et al. (1991) apresenta o valor mais elevado na classe de suscetibilidade baixa revelando-se igualmente desadequado.

Os restantes algoritmos apresentam valores similares, classificando a classe de suscetibilidade baixa com a maior percentagem e inversamente a classe de suscetibilidade elevada com a percentagem, de área de ocupação, mais reduzida., (Quadro 15).

Examinando agora as feições erosivas, (Quadro 16), verifica-se que nos primeiros dois algoritmos as feições erosivas distribuem-se maioritariamente nas classes de suscetibilidade baixa e moderada, sendo que a classe de suscetibilidade elevada também abarca um número bastante similar. No terceiro algoritmo o maior número de feições erosivas surge nas classes de suscetibilidade moderada e alta. No caso dos dois últimos algoritmos, mais de metade das feições ocorrem nas classes de suscetibilidade alta e moderada. Salienta-se ainda que as feições erosivas associadas à classe nula surgem de forma pouco significativa com valores iguais em todos os algoritmos.

Quadro 16 - Percentagem de feições erosivas por classe de suscetibilidade.

Classe	Moore <i>et al.</i> (1991)	Böhner & Selige (2006)	Desmet & Govers (1996)	Engel <i>et al.</i> (1991)	Mitasova <i>et al.</i> (1996)
Feições Erosivas					
1	2	2	2	2	2
2	67	72	64	0	24
3	87	88	81	67	180
4	62	56	71	149	12

De forma a validar, os resultados obtidos pelo método estatístico utilizou-se a curva ROC, onde é possível avaliar o grau de aproximação de cada modelo à realidade. (fig 58). Desta análise observa-se que o modelo estatístico, de predição da perda de solo, que se apresenta mais fiável é o que incorpora o algoritmo de Desmet & Govers (1996), seguindo-se os de Moore *et al.* (1991) e os de Böhner & Selige (2006) com valores muito similares, com um elevado grau de confiança. Os modelos obtidos com os algoritmos de Enge *et al.* (1991) e Mitasova *et al.* (1996) revelam os valores de fiabilidade reduzidos e bastante equivalentes entre si concluindo que estes são modelos inadequados visto que possuem um valor inferior a 75 %.

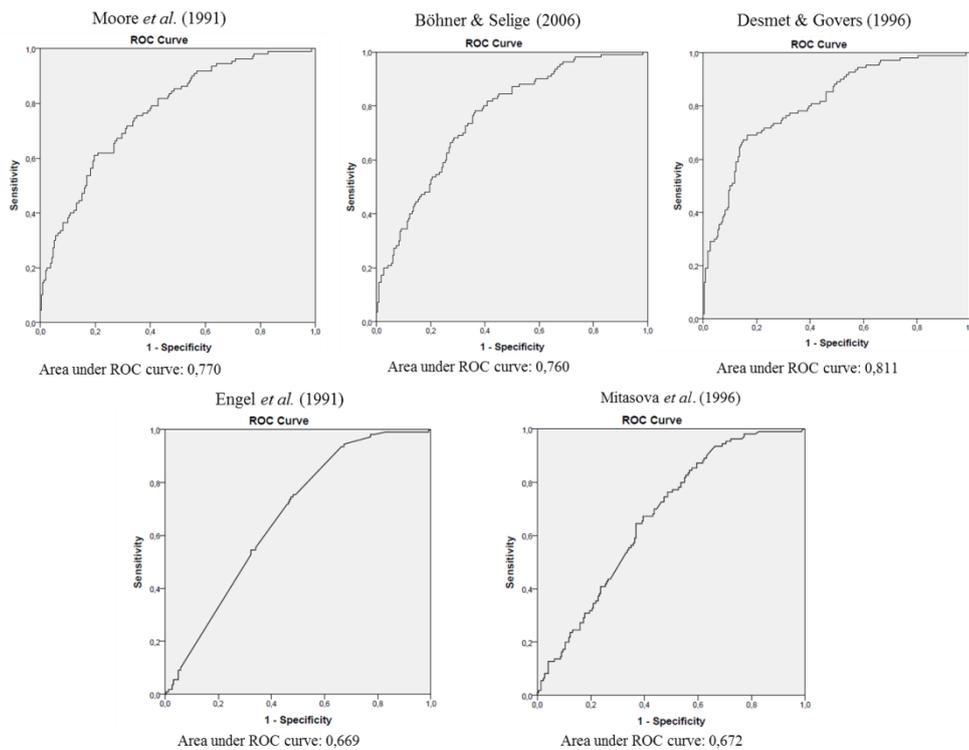


Figura 58 - Validação aplicada ao modelo de Regressão Logística.

2.7. VALIDAÇÃO

Seguindo as conceções teóricas explicitadas no cap. II, foi possível determinar os rácios para cada modelo da (R)USLE, seguindo os diferentes algoritmos do LS. No quadro 18, apresentam-se os resultados da validação.

Quadro 17 - Coeficientes de validação da Matriz de Confusão.

Rusle com diferentes algoritmos do LS	TPR	FPR	PREC	ACC	TPR/FPR
Moore <i>et al.</i> (1991)	0,410138249	0,215471414	0,000323468	0,784464953	1,903446224
Böhner & Selige (2006)	0,460829493	0,166291689	0,000470865	0,833644934	2,771211806
Desmet & Govers (1996)	0,460829493	0,123132064	0,00131598	0,876721505	3,742562886
Engel <i>et al.</i> (1991)	0,059907834	0,059449818	0,000171273	0,940400505	1,007704255
Mitasova <i>et al.</i> (1996)	0,059907834	0,02238426	0,000454752	0,977460	2,676337517

Analisando o resultado dos diferentes classificadores, segundo os diferentes algoritmos do LS, (Quadro 17), verifica-se que na sua generalidade, o rácio dos valores positivos apresenta um valor reduzido, sendo que o valor mínimo para ser considerado válido é 75%. Por outro lado, vislumbra-se que nos algoritmos de Engel *et al.* (1991) e Mitasova *et al.* (1996) o valor deste rácio é quase nulo, facto este, que se coaduna com os resultados pouco adequados estabelecidos na regressão logística. Estes resultados, gerais, pouco satisfatórios já eram previsíveis uma vez que o levantamento de campo não incidiu sobre a Qt^a de S. Luiz, na sua totalidade, contemplando apenas 219 feições erosivas levantadas.

Dissecando os resultados da fiabilidade, também um dos parâmetros mais importantes, na medida em que estabelece a razão entre todos os dados, é possível apurar resultados bastante satisfatórios. Porém este é um parâmetro que pode gerar enviesamento de dados, na medida em que se verifica que o modelo com valores mais diminutos, relativamente ao rácio dos valores positivos, é o que surge com a maior percentagem de fiabilidade.

Decorrente da aplicação do modelo estatístico e da validação à RUSLE, procedemos à aplicação do modelo SIMWE que considera processos de erosão acelerada contemplando a formação de feições erosivas em ravinas e barrancos.

3.RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO SIMWE NA QUINTA DE S. LUIZ

Dado que a (R)USLE não contempla processos de ravinamento, recorreremos a este modelo que considera a erosão por fluxo concentrado, através de uma simulação de fluxo de água, transporte e deposição de sedimentos na Quinta de S. Luiz.

Na figura 59 a) podemos observar que o movimento de água no solo é bastante lento denotando valores de 0 a 0.11 m, (facto que podemos associar aos valores diminutos de condutividade hidráulica na área em estudo, obtidos no âmbito do projeto ModRis).

Por outro lado a concentração de sedimentos, b), revela valores intermédios que rondam os 6,1 partículas/m³, b), e a deposição, c), adquire valores que rondam os 24 Kg/m²s, com maior relevância em áreas côncavas fundos de vale.

Na figura 60 d) e e) assumem valores bastante reduzidos sendo que se salienta que o fluxo superficial de água e), com uma valor médio de 0,19 m³/s, produz influencia direta no fluxo de sedimentos d), com um valor de 2.4 kg/ms, e consequentemente na capacidade de transporte f) que assume um valor de 23 kg/ms. Estes valores relacionam-se com a erodibilidade sendo possível compreender a suscetibilidade do solo à desagregação de partículas pelo fluxo superficial.

A figura f), que indica a capacidade de transporte das partículas do solo, de certa forma é um coeficiente influenciado pelas propriedades do solo e pelo efeito da vegetação, no nosso caso devido a uma forte presença de argila no solo a capacidade de transporte é mais reduzida. Por conseguinte, denota-se que este parâmetro exerce efeito direto no processo de erosão, da área em estudo, influenciando a distribuição espacial do fluxo de sedimentos, bem como a taxa de erosão/deposição (c). Relativamente à figura 61 g), os valores obtidos para o transporte de partículas limitado pela deposição, são na sua maioria 11 kg/m²s, um valor relativamente baixo, que pode ser associado ao fato do valor da concentração de sedimentos não exceder o valor da capacidade de transporte (Quadro 18).

Conclui-se que as áreas que apresentam maior suscetibilidade à erosão localizam-se sobretudo em vertentes convexas e em fundos de vale, onde o fluxo superficial c) exerce primordial influência. Por outro lado, pelo facto da concentração de sedimentos b) apresentar valores menores que a capacidade de transporte f) leva a que o fluxo superficial se torne o principal agente de desagregação das partículas. Por último salienta-se que grande parte das partículas, em deposição, surgem em áreas ocupadas por floresta, pinhal ou amendoal bem como em áreas côncavas de vertentes maioritariamente com orientação Nordeste.

Quadro 18 - Resultados do Modelo SIMWE.

Water depth	Water discharge	Transport capacity	Transport limited erosion-deposition	Sediment Concentration	Sediment Flux	Erosion Deposition
0,11 m	0,19 m ³ /s	23 kg/ms	11 kg/m ² s	6,1 partículas/m ³	2,4 kg/m ³ s	24kg/m ³ s

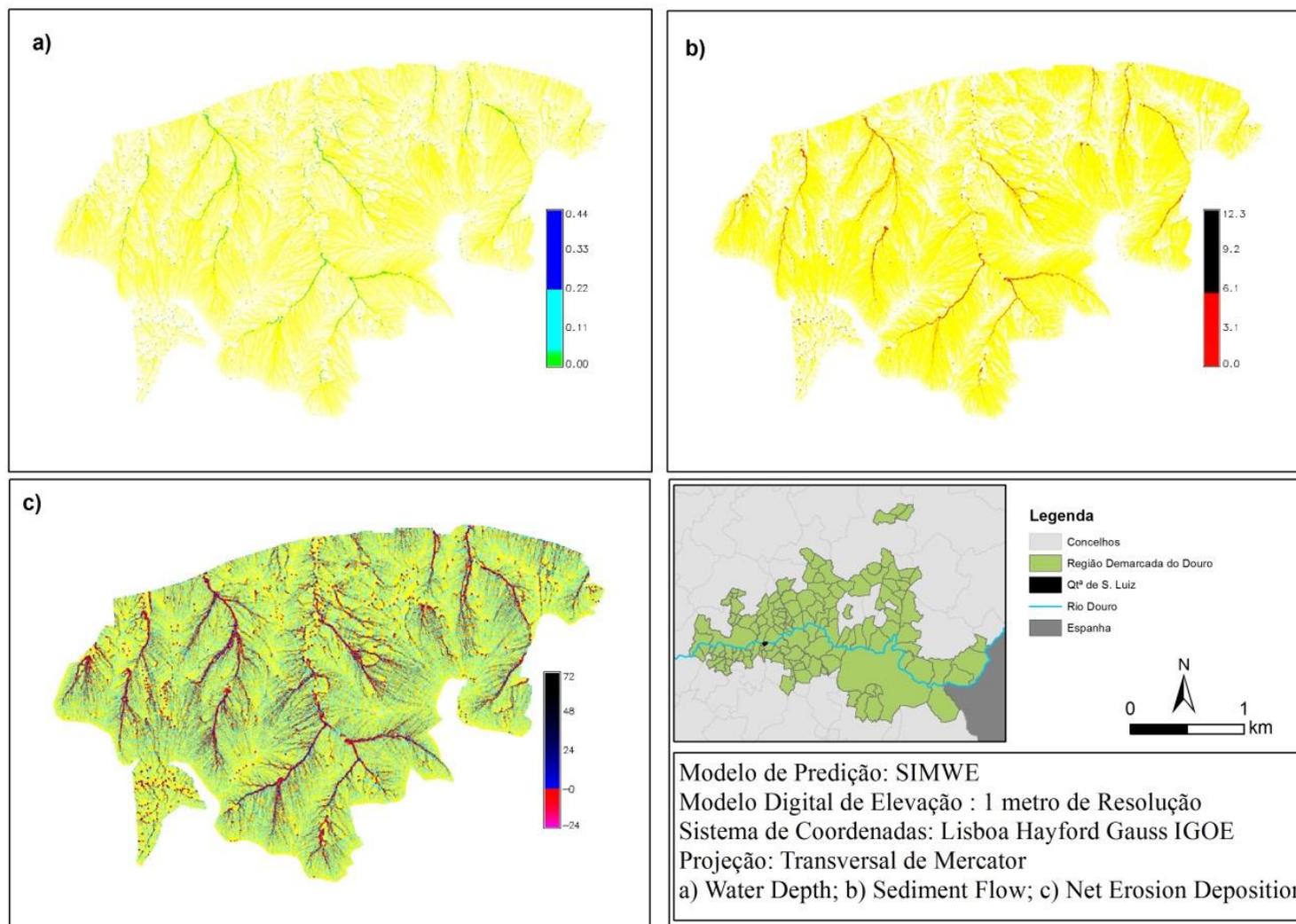


Figura 59 - Resultados do Modelo SIMWE: a) Water Depth; b) Sediment Concentration; c) Net Erosion Deposition.

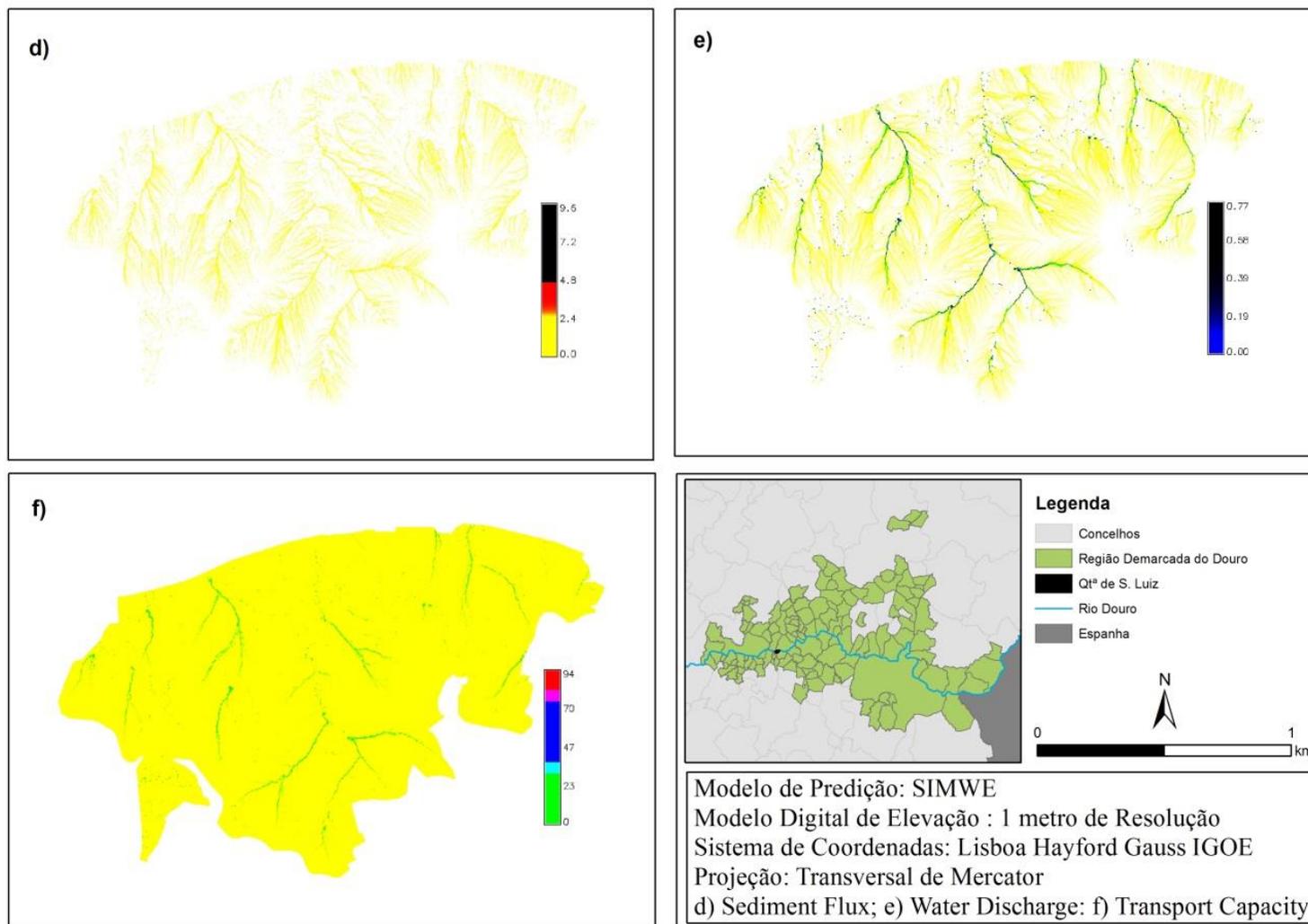


Figura 60 - Resultados do Modelo SIMWE: d) Sediment Flux; e) Water discharge; f) Transport Capacity.

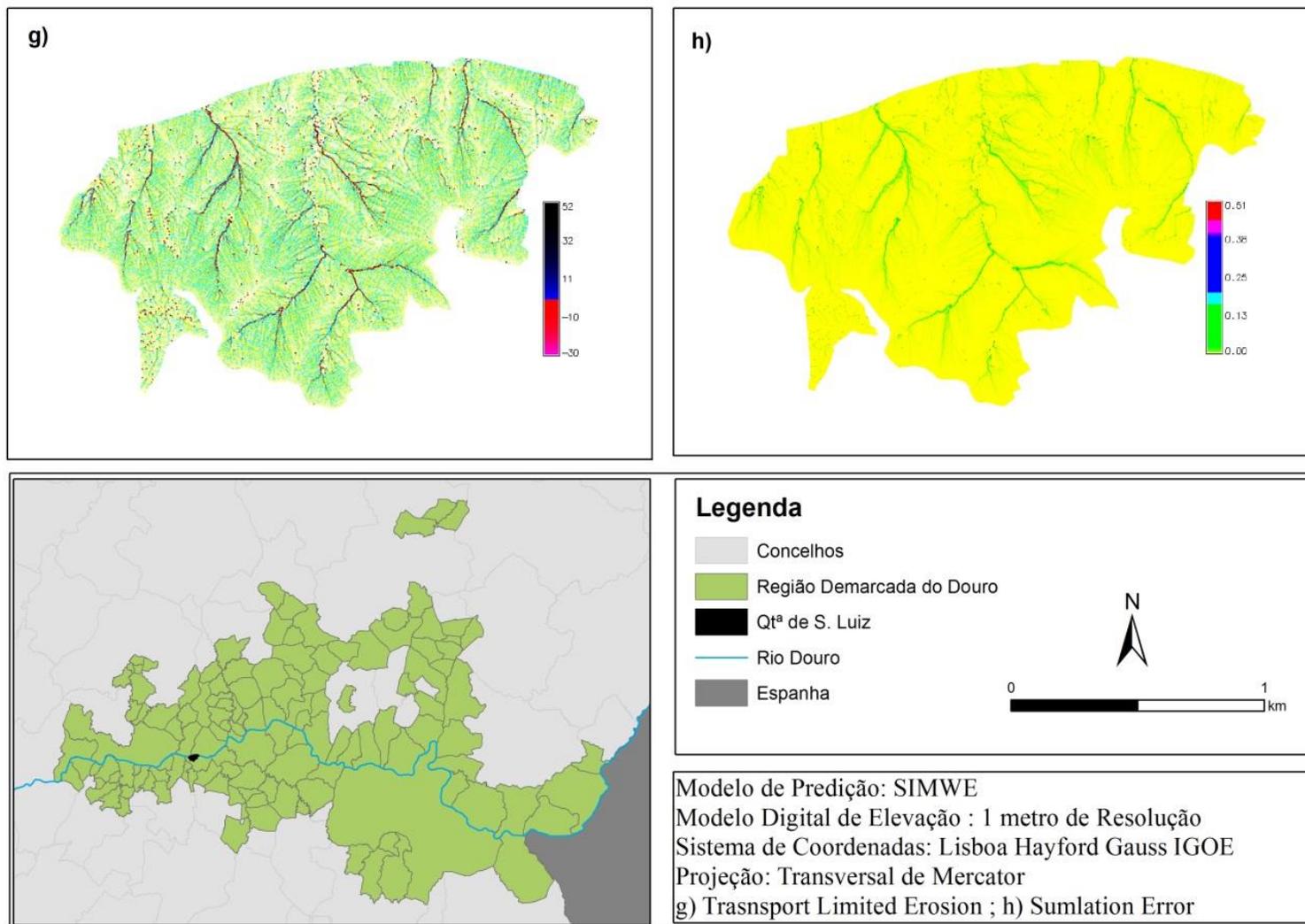


Figura 61 - Resultados do Modelo SIMWE: g) *Transport Limited Erosion-Deposition*; h) *Simulation Error*.

3.1. COMPARAÇÃO ENTRE A RUSLE E O SIMWE

Efetuar uma comparação entre estes dois modelos não é uma tarefa óbvia, na medida em que os parâmetros estimados para cada modelo não assumem similaridade, para além que foram desenvolvidos para serem aplicados em diferentes condições e para desiguais tipologias de feições erosivas.

No entanto, se considerarmos que o fator LS, da (R)USLE, é um parâmetro que depende do fluxo e que com o aumento do fluxo a capacidade de transporte e de desagregação é mais elevada é possível associar os resultados da figura f) ao fator LS da (R)USLE, uma vez que os valores mais elevados localizam-se nas mesmas áreas.

Por outro lado, quando a concentração de sedimentos b) é menor que capacidade de transporte f) a desagregação do solo é mais avultada, traduzindo-se numa perda de solo mais elevada. Desta forma as áreas em que estes valores são associados no modelo SIMWE correspondem às classes, da (R)USLE, com suscetibilidade elevada.

Outra das comparações que se pode efetuar relaciona-se com o fato dos valores da deposição c) excederem os valores da capacidade de transporte f) no modelo SIMWE, os quais podemos associar aos valores elevados de argila estimados no fator K da RUSLE, que promovem uma maior suscetibilidade à capacidade de transporte.

Ainda com o fator K, da (R)USLE, é possível aliar os valores diminutos da profundidade da água do SIMWE a), conseqüentemente os solos com uma elevada percentagem de silte e argila apresentam uma menor capacidade de infiltração.

Concluindo, verifica-se que para além da discrepância de associação dos parâmetros de cada modelo, e da (R)USLE considerar apenas erosão em sulcos e interssulcos contrariamente ao SIMWE, que contempla a erosão em ravinas, é possível estabelecer semelhanças entre os resultados obtidos, verificando que existe uma concordância entre as áreas mais suscetíveis à perda de solo e onde o fluxo concentrado é mais evidente.

Na (R)USLE é possível identificar a quantidade de perda de solo anual, enquanto que do SIMWE surgem resultados, de parâmetros que derivam desse processo. Por conseguinte achamos que estes dois modelos se complementam e produzem uma boa análise dos processos erosivos da área em estudo, resultando em valores que nos permitem discernir sobre medidas de mitigação dos mesmos.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÃO

Finda a sequência metodológica proposta para o desenvolvimento do objetivo, de identificar os setores mais suscetíveis à erosão hídrica na Qt^a. de S. Luiz, torna-se possível avaliar a competência das metodologias empregues para tal.

Neste sentido, considera-se que apesar da (R)USLE ter sido desenvolvida para prever a perda de solo anual por sulcos e interssulcos, revelou-se uma metodologia bastante fiável na identificação de perda de solo na área em estudo.

Por conseguinte, mediante a constatação da existência de diversos algoritmos para o cálculo do fator LS, resolvemos selecionar cinco dessas metodologias. Este procedimento por envolver o manuseio de dois softwares, poder-se-ia ter apresentado como uma limitação, porém traduziu-se numa mais-valia para o desenvolvimento deste trabalho, visto que se constatou que o fator LS é o que emprega mais influência no modelo final. Neste sentido os resultados obtidos, com o cálculo do fator LS no software SAGA GIS, revelaram-se bastante adequados à morfologia do terreno da área de estudo, demonstrando a presença de socacos e as vertentes com maior comprimento e inclinação precisamente nas áreas onde o declive é mais acentuado.

Por outro lado, os algoritmos de LS calculados no ArcGIS revelaram-se totalmente desadequados não demonstrando a morfologia da área de estudo, facto que se refletiu também no cálculo da erosão potencial e da erosão real.

Relativamente ao cálculo da erosão potencial e da erosão real pareceu-nos interessante efetuar essa distinção, na medida em que conseguimos discernir sobre o efeito que as variáveis C e P exercem na perda de solo anual. Assim revelou-se uma prevalência da área ocupada com a classe de suscetibilidade nula, inversamente à classe de suscetibilidade alta que apresenta menores valores de ocupação. Por esta razão torna-se importante efetuar uma comparação entre estas metodologias onde se verifica que a erosão potencial detém valores bastante mais reduzidos que a erosão real, com efeito advoga-se que os fatores C e P exercem um grande impacto na suscetibilidade à perda de solo anual.

De forma a comprovar a probabilidade de ocorrência de perda de solo, na área de estudo, recorreremos ao modelo de predição de regressão logística onde atentamos precisamente que, os coeficientes do fator P e C são os que produzem mais influência no cálculo do modelo final, com exceção dos modelos calculados para os algoritmos de

Moore *et al.* (1991) e Desmet & Govers (1996) onde o fator LS é variável com maior impacto. Os resultados obtidos na regressão logística para os algoritmos de Engel *et al.* (1991) e Mitsova *et al.* (1996) são completamente desadequados, uma vez que classificam a maior parte da área em estudo com suscetibilidade alta e moderada. Estes resultados comprovam-se com a validação deste método, pela curva ROC, onde se revela que o algoritmo de Desmet & Govers (1996) apresenta-se como o mais fiável.

Posteriormente, tornou-se necessário validar o modelo com o inventário efetuado *in situ*, onde se comprovou que as metodologias Engel *et al.* (1991) e Mitsova *et al.* (1996) não se ajustam à predição de perda de solo, na área em estudo, visto que apresentam um rácio de verdadeiros positivos pouco satisfatório. Estes valores reduzidos relacionam-se com a evidência de um inventário pouco completo, uma vez que não contempla a área toda da Qt^a de S. Luiz, visto que em contraponto os valores de suscetibilidade alta calculados na (R)USLE, coadunam-se com as áreas onde foram registadas feições erosivas e onde se sucederam os três eventos de intempéries identificados pela ADVID.

Perante o predomínio de feições erosivas em ravinas, na área de estudo, optamos por aplicar o modelo SIMWE. Este modelo foi desenvolvido no software Grass Gis, o que inicialmente se tornou uma limitação, na medida em que não é um software intuitivo e trabalha com uma estrutura de comandos, porém essa dificuldade foi ultrapassada e a sua utilização tornou-se fulcral para o desenvolvimento deste trabalho.

Esta é uma metodologia que em nada se assemelha à (R)usle uma vez que produz resultados mais quantitativos, porém também muito interessantes, na medida em que revela o valor de parâmetros que derivam do processo de perda de solo anual estimado na (R)USLE.

Assim, uma das principais conclusões que podemos retirar deste modelo é que as áreas mais suscetíveis são áreas onde os valores de fluxo superficial exercem mais influência, em muito motivados pelos valores de concentração de sedimentos serem menores que a capacidade de transporte resultando em áreas onde a desagregação de partículas é mais avultada.

Por último, assume-se que embora seja difícil a comparação entre estes dois modelos é possível efetuar uma associação de parâmetros tendo em conta a sequência processos envolvidos na erosão hídrica. Assim, conseguimos comparar diretamente alguns dos parâmetros do modelo SIMWE com os fatores de erodibilidade, inclinação e

comprimento de vertente da (R)USLE, os restantes parâmetros e fatores surgem associados de uma forma menos óbvia.

Assim sendo, consideramos que estas metodologias se complementam e traduzem-se num boa ferramenta para a predição de erosão hídrica na área em estudo.

Como perspetivas futuras achamos importante aplicar a (R)USLE a uma sub-bacia, na Qt^a. de S. Luiz, onde a perda de solo e o levantamento de feições erosivas sejam mais significativos. Por outro lado, seria interessante aplicar o SIMWE baseado apenas num evento de precipitação e restringindo-o somente a áreas onde as ravinas sejam mais recorrentes.

BIBLIOGRAFIA

- Abreu, S.; Reichert, J.; Silva, V.; Reinert, D.; Blume, E. (2003) - Variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas do Solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em argissolo franco-arenoso sob plantio directo. *Ciência Rural*. Vol. 33, nº 2, pp. 275-282.
- Aguiar, F. (2002) – O Alto Douro Vinhateiro, uma paisagem cultural, evolutiva e viva. *Douro- Estudos & Documentos*. Vol. VII (13), pp.143-152.
- Al-Durrah, M. M. e Bradford, J. M. (1982) - The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , nº46, pp. 1086-1090.
- Almorox, J.; López Bermúdez, F.; Rafaelli, S. (2010) - La degradación de los suelos por erosión hídrica. *Métodos de estimación*. Universidad de Murcia, 384 p.
- Amorim, A.; Silva, D.; Pruski, F.; Matos, A. (2001) - Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. *Agriambi, Campina Grande*, Vol. 5, nº1, pp. 124-130.
- Anjos, D. S. (2008) - Classificação da curvatura de vertentes em perfil via thin plate spline e inferência fuzzy. *Dissertação de Mestrado, UNESP*, 98p.
- Anjos, D.S.; Junior, M.M.; Nuunes, J.O.R. (2011) – Classificação da curvatura das vertentes em perfil via modelo numérico. *Anais XV Simpósio Brasileiro de sensoriamento remoto. SBSR, Curitiba, PR. Brasil*, pp. 2286-2293.
- Balmforth, N.; Mandre, S. (2004) - Dynamics of roll waves. *Journal Fluid Mech.*, V. 514, pp. 1-33.
- Barbosa, D. (2006) – O Sistema de Informação Geográfica e a atribuição do benefício: A vinha na Região Demarcada do Douro. *Tese de Mestrado, Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa*. 114 p.
- Bateira, C. (2001) - Movimentos de vertente no NW de Portugal, susceptibilidade geomorfológica e sistemas de informação geográfica. *Tese de Doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade do Porto*. 469 p.
- Bateira, C. (2006) – TERRISC: Recuperação de paisagens de terraços de terra e prevenção de riscos naturais (SUDOE III B). Porto.
- Bateira, C.; Martins, L.; Santos, M.; Pereira, S. (2011) – Cartografia da susceptibilidade a movimentos de vertente na Região Demarcada do Douro. *Universidade Lusófona, Porto*. 38 p.
- Bateira, C.; Pacheco, E.; Soares, L.; Pereira, S.; Seixas, A., Hermenegildo, C. (2007b) - Hidrologia de terraços agrícolas e instabilidade de vertentes no vale do Douro. In: *Marjades I Prevenció de Riscs Naturals. Consell de Mallorca*, pp. 41-66.
- Bateira, C.; Pereira, S.; Hermenegildo, C.; Seixas, Â.; (2007a) - relação entre episódios chuvosos e escoamento na bacia hidrográfica da Carriça (Vale do Douro - Baião) - , *Publicações da APGeom, Vol.V*, pp.93-105.
- Bateira, C.; Seixas, A.; Pereira, S.; Hermenegildo, C.; Cancela, M.. (2005) - Áreas experimentais de monitorização do funcionamento hidrodinâmico de vertentes

- organizadas em patamares agrícolas. X Colóquio Ibérico de Geografia. Disponível em: http://www.apgeo.pt/files/docs/CD_X_Coloquio_Iberico_Geografia/pdfs/087.pdf
- Beck, M.(1987) - Water quality modelling: a review of uncertainty. *Water Resources Research*, 23 (8), pp.1393-1442
- Bennett, J. (1974) - Concepts of mathematical modelling of sediment yield. *Water Resources Research*, 10, pp.485-492.
- Bergonse, R.; Reis, E. (2011) – Formas, processos e padrões na erosão por ravinamento: para um enquadramento teórico coerente. *Finisterra*, XL-VI, 92, p. 99-120.
- Berry, L.; Ruxton, P. (1960) - Mass movement and landform in New Zeland and Hong Kong. *Transactions of Royal Society of New Zeland.*, Vol. 88, Part 4, pp. 623-629.
- Bertoni, J. e Lombardi Neto, F. (1999) - Conservação do solo. 2ª Ed. São Paulo, Ícone, 355p.
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. (1990) - Conservação do solo. 2ª Ed. São Paulo, Ícone, 355p.
- Boardman, J. (2006) - Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*, 68, pp. 73-86.
- Boardman, J. (2007) - Soil erosion: the challenge of assessing variation through space and time. In: Goudie, A.S. and Kalvoda, J. (eds.) *Soil erosion: the challenge of assessing variation through space and time*. Nakladatelsti P3K, Prague, pp. 205-220.
- Bock, M.; Böhner, J.; Conrad, O.; Köthe, R.; Ringeler, A. (s/d) - XV. Methods for creating functional soil databases and applying digital soil mapping with SAGA GIS. Status and Prospect of soil information in South-Eastern Europe. *JRC Scientific and Technichal Reports*. pp. 149-189.
- Böhner J.; Selige, T. (2006) - Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. In: *SAGA – Analysis and Modelling Applications*. Verlag Erich Goltze GmbH, pp. 13-27. Böhner J.; Köthe, R.; Conrad, O.; Gross, J.; Ringeler, A.; Selige, T.
- Boix, C.; Calvo, A.; Schoorl, J. ; Soriano-Soto, M. (1996) – Algunos ejemplos de relacion entre agregacion, capacidad de infiltracion y erosion en suelos mediterráneos. *Cuadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*. Coruña: 4.ª reunion nacional de Geomorfologia, n.º 21, pp.573-585.
- Boon, W.; SAVAT, J. (1981) - A nomogram for the prediction of rill erosion. In: *Soil Conservation, Problems and Prospects*. Ed. R. Morgan. J. Wiley, Chichester, pp.303-319. Böhner J.; Köthe, R.; Conrad, O.; Gross, J.; Ringeler, A; Selitge, T. (s/d) - *Soil Regionalisation by Means of Terrain Analysis and process Parametrisation*. European Soil Bureau, Research Report , nº 7, pp.213-222.
- Bryan, R. B. (1987) - Processes and significance of rill development. *Catena*, 8:1-15
- Buckingham, E. (1907) - *Studies on the movement of soil moisture*. U.S. Department of Agriculture, Bureau of Soils, Washington D.C., 61p.
- Bull, L. J.; Kirkby, M. J. (Eds.) (2002) - *Dryland Rivers: hydrology and geomorphology of semi-arid channels*. John Wiley & Sons. 398p. Burrough, P. (1986) - *Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment*. Oxford University press, New York. 193 p.

- Bull, L.; Kirkby M. (1997) - Gully processes and modelling. *Progress in Physical Geography*, 21 (3), pp.354-374.
- Cabral, J.; Ribeiro, A. (1988) - Carta neotectónica de Portugal continental. Escala 1: 1 000 000. Direcção Geral de Geologia e Minas. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais.
- Cappus, P. (1960) Bassin experimental d'Alrance: etudes dês lois de l'écoulement. Application au calcul et a la prevision des debits. *La Houille Blanche*, v. A, pp. 493-514.
- Cârdei, P. (2010) - The dimensional analysis of the USLE - MUSLE soil erosion model. *Proc. Rom. Acad., Series B*, 2010, 3, pp. 249–253.
- Carrera Morales, J. A. (1990) - El Proyecto LUCDEME: lucha contra la desertificación en el Mediterráneo. *Ecologia, fuera de serie*(1) pp.199-211.
- Carrera Morales, J. A. (1990) - The LUCDEME project: studies carried out and their present situation. In: Rubio, J. L., eds, *Strategies to Combat Desertification in Mediterranean Europe*. CEC Report, Eur 11175 EN/ES, Brussels. pp. 384-405.
- Casali, J.; Lopez, J.J.; Giraldez, J.V (1999) - Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). *Catena*, 36(1-2) pp. 65-84.
- Catalão, M. (2009). *Erosão Hídrica na Bacia Hidrográfica da Ribeira da Meia Légua*. Tese de Mestrado apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 110 p.
- Catalão, M.; Pacheco, F. (2010) - Perdas de solo e risco de erosão na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua. VII Congresso Nacional de Geologia. *Revista Electrónica de Ciências da Terra*, V. 9, nº 3, 4 p.
- Checcia, T. (2005) - Avaliação da perda de solo por erosão hídrica e estudo de energia na bacia do Rio Caeté, Alfredo Wagner – Santa Catarina. Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental, 118 p.
- Coelho C. (2006) - Portugal. In: J. Boardman e J. Poesen (Eds.) *Soil erosion in Europe*. Chichester, UK. John Wiley & Sons, 878p.
- Coelho C.; Ferreira. A. (2004) - Overland flow generation processes, erosion yields and solute loss following different intensity fires. *Quarterly Journal Of Engineering Geology And Hydrology*, nº37, pp. 233-240.
- Coelho, C.; Shakesby, R.; Walsh, R. (1995) - Soil and groundwater research report V - Effects of forest fires and post-fire land management practice on soil erosion and stream dynamics, Águeda basin, Portugal. Luxembourg, European Commission (Environment Research Programme), 91 pp.
- Colangelo, A. C. (1989) – Carta de feições mínimas. XIV Congresso Brasileiro de Cartografia, Gramado – RS, pp. 375-380.
- Colangelo, A. C. (2011) - Modelo de feições mínimas ou das unidades elementares do relevo: um suporte cartográfico para mapeamentos geoecológicos In: *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, n.10, pp.29-40

- Costa, A. (2009) - A aplicabilidade dos SIG e das imagens de satélite na identificação de áreas com potencial arqueológico: Estações arqueológicas da idade do ferro, FLUP. 137p.
- Courtney, F.; Trudgill, S. (1984) - *The Soil: An Introduction to Soil Study*. London, Edward Arnold, 123p.
- Cowen, D. (1988) - GIS versus CAD versus DBMS: What are differences Photogrammetric Engineering and Remote Sensing , 54 (11), pp. 1551-1555.
- Dalrymple, J.; Long, R.; Conacher, A. (1968) - A hypothetical nine-unit land- surface model. *Zeitschrift fur Geomorphologie*,12, pp. 60-76.
- Daveau, S. (1977) - Répartition et Rythme des Précipitations au Portugal. Lisboa, CEG-UL, 192 pp.
- Daveau, S. (1988) - Comentários e actualizações. In: Ribeiro, O., Lautensach, H. & Daveau, S., *Geografia de Portugal: o ritmo climático e a paisagem*, João Sá da Costa (Ed.), pp.483-535.
- De Ploey J. (1989) - Soil erosion map of western Europe. CATENA. Laboratory of Experimental Geomorphology, Leuven, Belgium.
- Desmet, P.; Govers, G. (1996) – A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, V. 51, nº 5, pp. 427-433.
- Dunne, T.; Black, R. (1970) - Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research*, V. 6, pp. 1296-1311.
- EEA (2000) – *Down to Earth: soil degradation and sustainable development in Europe*. Environmental Issues Series. Environment Agency. No 16, 32p.
- Ellison, W.D. (1947) - Soil Erosion studies - part II: soil detachment hazard by raindrop splash. *Agric. Eng.*, 28, pp. 197-2001.
- Engel, B. (1999) - Estimating soil erosion using RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) Using ArcView. <http://danpatch.ecn.purdue.edu/~engelb/abe526/gisrusle/gisrusle.html>.
- Engel, B. A., R. Srinivasan, and C. C. Rewerts. (1991) - A GIS toolbox approach to hydrologic modeling. Presented at GRASS 1991 User's Conference. Berkley, CA.
- Fauvrelle, N. (2007) – Formas de armação do terreno no Alto Douro Vinhateiro: protecção e gestão da paisagem. *População e Sociedade*, nº 13, pp. 87-96.
- Fawcett, T. (2006) - An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. Vol. 27. nº 8. p. 861-874.
- Ferreira, A. (1991) - (1991) – Neotectonics in northern Portugal. A geomorphological approach”, *Z. Geomorph. N. F., Suppl.-Bd 82*, pp. 73-85.
- Ferreira, A.B.; Rodrigues, M.L.; Zêzere, J.L. (1995) – A cartografia geomorfológica de Portugal. in: *Os Mapas em Portugal*, Lisboa, ed. Cosmos, pp.183-222.
- Ferreira, C. (1996-1997) - Erosão hídrica em solos florestais. Estudo em povoamentos de Pinus pinaster e Eucalyptus globulus em Macieira de Alcôba – Águeda. *Revista da Faculdade de Letras - Geografia, I Série, Vol.XII/XIII*, Porto, p. 145-244.
- Ferro, V. e Porto, P. (2000) – A sediment delivery distributed (SEED) model. *Journal of Hydrology, Engng, ASCE*, 5(4), pp. 411-422.

- Flanagan, D.; Laflen, J. Meyer, D. (2003) - Honoring the Universal Soil Loss Equation. American Society of Agricultural Engineers, USDA e Purdue University, 8 p.
- Flanagan, D.C.e Nearing, M.A. (1995) - United States Department of Agriculture-USDA: Water Erosion Project. West Lafayette, National Soil Erosion Research Laboratory – NSERL.
- Flanagan, D; Gilley, J.; Frant, T (2007) – Water erosion prediction project (WEPP): Development History, Model Capabilities, and Future Enhancements. Biological Systems Engineering: Papers and Publications. Paper 27, pp.1603-1612.
- Foster, G. (1986) - Soil Conservation: An Assessment of the National Resources Inventory. Committee on Conservation Needs and Opportunities, National Research Council, Vol. 2, pp. 90-115.
- Foster, G. R. (1982) - Modeling the erosion process, in Hann, C. T., Jonson, H. P., and Brakensiek, D. L. (eds), Hydrologic Modeling of Small Watersheds, Monogr. Ser., vol. 5. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph. p.21
- Foster, G.R. e Meyer, L.D. (1972) – Transport of soil particles by shallow flow. Transactions of ASAE 20 (4), pp.678-682.
- Foster, G.R.; McCOOL, D.K.; Renard, K.G. & Moldenhauer, W.C. (1991) - Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. J. Soil Water Conserv.36, pp. 355-359,
- Foth, H. (1990) - Fundamentals of Soil Science. 8th Ed., Michigan State University, , 353p.
- Frezze, R. (1971) - Three-dimensional, transient, saturated unsaturated flow in a groundwater basin. Water Resources Research, Vol. 7, nº. 2, pp 347-366.
- Furegatti, S. (2012) - Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios in situ. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. 467 p.
- Gabler, R.; Petersen, J.; Trapasso, L. (2007) - Essentials of physical geography. 8th Ed., Thomson Brooks/cole, 658p.
- García Ruiz, J.; López Bermúdez, F. (2009) - La erosión del suelo en España. Sociedad Española de Geomorfología, 441 p.
- Gardner, W.; Widtsoe, J. (1921) - The movement of soil moisture. Soil Science, Vol. 11, pp. 215-232.
- Glim, J. e Jaffe, A. (1972) - Quantum Physics: A Functional integral point of view. Springer-Verlag, New York.
- Gonzalez Hidalgo e M. Echeverria (1990)– « Producción de flujo bajo diferentes grados de cubierta vegetal en laderas de exposición topográfica contrastada », Teruel, I Reunión Nacional de Geomorfología, pp. 597-605.
- Govers, G., (1985) - Selectivity and transport capacity of thin layer flows in relation to rill generation. Catena, nº12, pp. 35-49.
- Grimm, M.; Jones, R.; Montanarella, L. (2002) – Soil erosion risk in Europe. European Soil Bureau, Institute for Environment & Sustainability, JRC Ispra. 44 p.

- Grimm, M.; Jones, R.; Rusco, E.; Montanarella, L. (2003) – Soil erosion risk in Italy: a revised USLE approach. European Soil Bureau Research Report, n.º 11, EUR 20677 EN, (2002). Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 28 p.
- Haan, C.; Barfield, B.; Hayes, J. (1994) - Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press 588 p. Harvey, M. ; Gutiérrez-Elorza, M. (2005) - Repeated Patterns of Quaternary Discontinuous Gullyng at el Tormillo, Ebro Basin, Spain. In: Garcia, C. e Batalla, R. J. (Eds.) Catchment Dynamics and Rivers Processes: Mediterranean and Other Climate Regions. Elsevier, pp. 53-67.
- Hack, J.; Goodlett, J. (1960) – Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians. US Geological Survey Professional Paper 347, Reston, VA, 66p.
- Hasholt, B. (2002) – On assessment of erosion and model validation. Modelling erosion, sediment transport and sediment yield. Wolfgang Summer and Desmond E. Walling (Eds.), pp.229-242.
- Hewlett, J.; Hibbert A. (1967) - Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: Sopper, W.E. & Lull, H. W. (eds), Forest Hydrology, Proceedings of a National Science Foundation Advance Science Seminar, Pergamon Press, New York, pp. 275–290.
- Hewlett, J.; Hibbert, A. (1963) - Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. Journal of Geophysical Research, n.º 68, pp. 1081–87.
- Hillel, D. (1998). Environmental Soil Physics. Academic Press, New York, USA, 771 p.
- Horton R. (1933) - The role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions, American Geophysical Union, n.º14, pp. 446 –460.
- Horton, R. (1945) - Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America, n.º56, pp. 275-370.
- Hudson, N. (1986) – Soil Conservation. BT Batsford Limited. London
- Huggett, R. (1975) - Soil landscape systems: A model of soil genesis. Geoderma 13, pp.1–22.
- Ibáñez, J.; Sánchez Díaz, J.; De la Rosa, D.; De Alba, S. (1999) – “Soil Survey, Soil Databases and Soil Monitoring in Spain”, European Soil Bureau of Research, Relatório n.º 6, pp. 135-144.
- Jetten V.; De Roo A. (2001) - Spatial analysis of erosion conservation measures with LISEM. In Landscape Erosion and Evolution Modelling, Harmon RS, Doe WW (Eds). Kluwer Academic: New York; 429–445.
- Jordan, A. e Bellinfante, N. (2000) - Cartografía de la erosividade de la Lluvia Estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo Gibraltar (Cádiz). Edafología 7:3, pp.83-92.
- Julien, P.Y.; Saghafian, B.; Ogden, F.L. (1995) – Raster-based hydrologic modelling of spatially varied surface runoff. Water Resources Bulletin 31, pp. 523-536.
- Karlin, S. e Taylor, H.M. (1981) – A second course in stochastic processes. Academic, San Diego, Calif.

- Karman, I. (2000) - O ciclo da água subterrânea e a sua acção geológica. In: Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, Cap. 7.
- Karydas, C.; Panagos, P.; Gitas, L. (2012) - A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*, DOI:10.1080/17538947.2012.671380. 23 pp.
- Kirkby, M. J.; Jones R.J.A.; Irvine, B.; Gobin, A.; Govers, G.; Cerdan, O.; Van Rompaey, A. J. J.; Le Bissonais, Y.; Daroussin, J.; King, D.; Montanarella, L.; Grimm, M.; Vieillefont, V.; Puigdefabregas, J.; BoeR, M.; Kosmas, C.; Yassoglou, N.; Tsara, M.; Mantel, S.; Van Lynden, G. J.; Huting, J. (2004) – European Soil Bureau Research Report. No. 16, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, p. 18
- Kirkby, M.J. e Chorley, R.J. (1967) - Throughflow, overlandflow an erosion. *Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 12:3, pp. 5-21.
- Kleissen, F.; Wheater, M; Beck,, M.; Harriman, R., (1990) - Conservative mixing of water sources: Analysis of the behavior of the Allta' Mharcaidh catchment. *J. Hydrol.*, 116, pp365-374,
- Kouhpeima A.; Feiznia, S.; Ahmadi, H. (2011) - Tracing fine sediment sources in small mountain catchment. *Water Sci Technol*, 63, pp. 2324-2330
- Laflen, J. M. (1985) - Effect of tillage systems on concentrated flow erosion. In *Soil Conservation and Productivity*, Vol. 2, Universidad Central de Venezuela, Maracay, pp. 798-809
- Laflen, J. M.; Moldenhauer, W. (2003) - Pioneering soil erosion prediction: The USLE Story. *World Association of Soil and Water Conservation. Special Publication n°. 1*. Beijing: Michael A. Zoebisch. 54p.
- Le Gouée, P.; Delahaye, D.; Bermond, M.; Marie; M.; Douvinet, J.; Viel, V. (2010) - Scales : a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (Northern-Western France), *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 8, 30, pp. 887–901.
- Lencastre, A.; Franco, F. (2010) – *Lições de Hidrologia*. 3.^a Edição revista. Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 451 p.
- Leon, L. F. e George, C. (2011) - *Map Window Interface for AGNPS (MWAGNPS)*. 57p.
- Leopold, B.; Wolman, M.; Miller, J.. (1964) - *Fluvial processes in Geomorphology*. Freeman, San Francisco, 406 p.
- Lilly, A.; Grieve, I.C.; Jordan, C.; Baggaley, N.; Birnie, R.; Futter, M.; Higgins, A.; Hough, R.; Jones, M.; Noland, A.; Stutter, M.; Towers, W. (2009) – Climate change, land management and erosion in the organic and organo-mineral soils in Scotland and Northern Ireland. *Scottish Natural Heritage Commission, Report n°.325 (ROAME No. F06AC104 – SNIFFER UKCC21)*, 262 p.
- López-Bérmudez, F. e Romero-Díaz, A. (1992-93) - Génesis y consecuencias erosivas de las lluvias de alta intensidad en la region Mediterránea. *Cuadernos de investigación geográfica*, 18-19, pp.7-28.
- Loureiro, N. ; Coutinho M. (2001) - A new procedure to estimate the Rusle EI30 index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve Region, Portugal. *Journal of Hydrology*, n°250, pp. 12-18.

- Lourenço, L. (1999) - Perfiladores para levantamento de microformas de relevo. Finisterra, nº 67-68, pp. 71 - 82.
- Lourenço, L. (2001) – Instrumentos e técnicas simples usadas no campo para medir os efeitos da actuação dos processos geomorfológicos, Porto, Encontro sobre Metodologias de Estudo de Processos de Erosão dos Solos, pp. 1-31.
- Lourenço, L. (2004a) - Riscos de Erosão após Incêndios Florestais. Colecção Estudos nº 52, Colectâneas Cindínicas V, 187 p.
- Lourenço, L. (2004b) - Risco Meteorológico de Incêndio Florestal. Colecção Estudos nº46, Colectâneas Cindínicas II, 177 p.
- Lourenço, L. (2009) – Plenas manifestações do risco de incêndio florestal em serras do centro de Portugal. Efeitos erosivos subsequentes e reabilitações pontuais. Territorium, Revista da Associação Portuguesa de Riscos. Prevenção e Segurança, No. 16, pp. 5-16.
- Lourenço, L., Bento Gonçalves, A.; Monteiro, R. (1991) - Avaliação da erosão dos solos produzida na sequência de incêndios florestais. Comunicações, II Congresso Florestal Nacional, Porto, II vol, p. 834-844;
- Lourenço, L.; Bernardino, S. (2013) - Condições Meteorológicas e Ocorrência de Incêndios Florestais em Portugal Continental (1971-2010). Cadernos de Geografia, nº30-31, pp. 105 - 132.
- Magalhães, N. (Coord.) (2012) - Manual de Boas Práticas Vitícolas na Região Demarcada do Douro. IVDP-CCDRN, 62p.
- Martins (2005) - Processos de Erosão Acelerada na Região Demarcada do Douro. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 197 p.
- Mc Dougall, N., Brenchley, P.J., Rebelo, J.A. & Romano, M. (1987) – Fans and fan deltaprecursors to the Armorican Quartzite (Ordovician) in western Iberia. Geological Magazine, 124 (4), pp. 347-359.
- McCauley, A.; Jones, C. (2005) – Managing for soil erosion, Soil & Water Management , Module 3, Montana State University Extension Service, 12p.
- McCool, D.; Foster, G.; Renard, K.; Yoder, D.; Weesies, G. (1995) - The Revised Universal Soil Loss Equation. Proceedings from Dod Interagency Workshop on Technologies to Address Soil Erosion on Dod Lands. San António, T. X pp. 195-202.
- Mendonça, M.; Tucci, C. (1997) - Escalas hidrológicas. III: hipótese integradora de processos na bacia vertente. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH, Vol. 2, nº 1, pp. 59-122.
- Meneses, B. (2012) - Erosão hídrica dos solos caso de estudo do concelho de Tarouca. Dissertação de Mestrado em Gestão do Território, Área de Especialização em Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa, 137p.
- Merritt, E. (1984) – The identification of four stages during microrill development. Earth Surface Processes and Landform 9, pp. 493-496
- Merritt, E. (1984) – The identification of four stages during the micro-rill development. Earth Surf. Processes Landforms, 9, pp. 493-496.

- Merritt, W.; Letcher, R.; Jademan, A. (2003) - A Review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*. V. 18., p. 761-199.
- Mitas, L. ; Mitasova, H. (1998) - Distributed erosion modeling for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, Vol. 34, nº 3, pp. 505-516.
- Mitasova, H. ; Mitas, L. (2001) - Multiscale soil erosion simulations for land use. *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. Cap. 11, New York, pp. 321-322.
- Mitasova, H.; Hofierka, J.; Zlocha, M.; Iverson, L. (1996) – Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Gis*, 10(5), pp. 629-641.
- Mitasova, H.; Hofierka, J.; Zlocha, M.; Iverson, L.; 1996) Modelling topographic potential for erosion and deposition using Gis. *International Journal of Gis*, 10 (5), pp. 659-641.
- Mitasova, H.; Mitas, L. (1999) - Multiscale simulation of land use impact on soil erosion and Deposition Patterns. 10th International Soil Conservation Organization Meeting. Purdue University USDA-ARS National Erosion Research Laboratory. 7p.
- Montgomery, D. R. e Dietrich, W. E. (1989) – Landscape dissections and drainage area-slope thresholds. In: M. J. Kirkby (ed.) *Processes Models and Theorical Geomorphology*, pp. 221-46.
- Montgomery, D. R. e Dietrich, W. E. (1989) – Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resources Research* 25, pp. 1907-1918
- Moore, I.D.; Grayson, R. B.; Ladson A. R. (1991) – Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes* 5:3 pp.1294-1298.
- Moreira, N.; Búrcio, M.; Dias, R.; Coke, C. (2010) – Partição da deformação Varisca nos sectores de Peso da Régua e Vila Nova de Foz Côa (Autóctone da Zona Centro Ibérica). *Comunicações Geológicas*, T. 97, pp. 147-162.
- Moss et al. (1982)
- Morgan R.P.C.(1986) - *Soil Erosion and Conservation*. Longman Group UK Ltd., Essex: 225p.
- Morgan, R.; Quinton, J.; Smith, R.; Govers, G.; Poesen, J.; Auerswald, K.; Chisci, G. (1998) – The European Soil Erosion Model (Eurosem): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, pp. 527-544.
- Morgan, R.P.C. (2005) - *Soil erosion and conservation*. 3rd Edition. Blackwell Publishing, Oxford, 304 p.
- Moura, (1991) - Geometria do relevo e estratigrafia do quaternário como base à tipologia de cabeceiras de drenagem em anfiteatro-médio Vale do Rio Paraíba Sul. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(3), pp. 255-265.
- Nearing, M. ; Lane, J.; Lopes, V. (1994) - Modeling soil erosion. In: R. Lal (Ed.)
- Nunes, A.; Vieira, A.; Lourenço, L.; Bento-Gonçalves, A.. (2012) Erosividade da precipitação em Portugal Continental : variação espacial e tendências na segunda metade do século XX. In: *Actas do XIII Colóquio Ibérico de Geografia*, Santiago de Compostela , pp. 1134 - 1143.
- Oostwoud-Wijdenes, D. J.; Poesen, J.; Vandekerckhove, L; Nachtergaele, J.; De Baerdemaeker, J. (1999) – Gully-head morphology and implications for gully development on abandoned

- fields in a semi- arid environment. Sierra da Gata, Southeast Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, pp. 585-603.
- Pedrosa, A.; Martins, M.; Pedrosa, F. (2004) – Processos de erosão acelerada. Região Demarcada do Douro: um património em risco. *Douro-Estudos & Documentos*, nº17, pp. 213-238.
- PENT (2007) Plano estratégico nacional do turismo. Ministério da Economia e Inovação. 133p.
- Pereira, C. (2009) - Reestruturar a vinha na Região Demarcada do Douro. Centro de Estudos Vitivinícolas do Douro / Núcleo de Vitivinicultura, 8 p.
- Pereira, E.S. (2000) – Carta geológica de Portugal à escala:1:200.000, folha 2, Lisboa, Instituto Geológico e Mineiro.
- Pereira, G. M. (2000) – “ Vinho do Porto”. In Barreto, A.; Mónica, F. (dir.) — Dicionário de História de Portugal. Suplemento. Vol. 9. Porto: Figueirinhas, p. 597-600.
- Peters, N. (1994) - Hydrologic Processes. In: *Biogeochemistry of Small Catchments: A Tool for Environmental Research*. Scope, pp. 207-228.
- Pimenta, M. (1998) - Directrizes para a aplicação da equação universal de perda dos solos em SIG: factor de cultura C e factor de erodibilidade do Solo K. Instituto da Água (INAG), Direcção de Serviços de Recursos Hídricos, 13 p.
- Poesen, J. (1993). Gully Typology and gully control measures in the European loess belt. In: Wicherek, S. (Ed.), *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. Elsevier, Amsterdam, pp. 221-239.
- Poesen, J. ; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G.; Valentin, C. (2003) - Gully erosion an environmental change: Importance and Research Needs. *Catena*, Vol.50, pp. 91-133.
- Poesen, J. e Govers (1990) – Gully erosion in the Loam Belt of Belgium: typology and control measures. In *Soil Erosion on Agricultural Land*, Boardman, Foster & Dearing (Eds.), pp. 513-530.
- Poesen, J., (1989) - Conditions for gully formation in the Belgian Loam Belt and some ways to control them. *Soil Technology Series* 1, pp. 39–52.
- Prieto, C. (2010) – Investigação sobre a implantação de loteamentos e a ocorrência de processos erosivos: voçoroca situada no jardim Santa Edwiges em Ponta Grossa – PR. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Ponta Grossa. 98 p.
- Rauws, G.(1987)- The initiation of rills on plane beds of non-cohesive sediments. *Catena*, Vol. 8, pp. 107–118.
- Rebelo, F. (1982) – Considerações metodológicas sobre o estudo dos ravinamentos. *Comunicações do II Colóquio Ibérico de Geografia*, Lisboa, C.E.G., Vol. I, pp. 339-350.
- Rebelo, F. (2003) - Riscos Naturais e Acção Antrópica. *Estudos e Reflexões*. Coimbra, Imprensa da Universidade, 2ª Ed. , 286p.
- Rebelo, J. A. e Romano, M. (1986) – A contribution to the lithostratigraphy and paleontology of the lower paleozoic rocks of the Moncorvo region, Northeast Portugal. *Comun. Serv. Geol. de Portugal*, Lisboa, 72, pp.45-48.

- Renard K. ; Foster, G.; Weesies, G.; McCool, D.; Yoder, D. (1997) - Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook nº 703, 404 p.
- Renard K. e Foster, G. (1985) Managing rangeland soil resources: The Universal soil loss equation. *Rangelands*, 7, pp.118-122.
- Renard, K. ; Foster, G. (1983) - Soil Conservation: Principles of Erosion by Water. Dryland Agriculture – Agronomy Monograph nº 23, pp. 155-175 pp.
- Renard, K., Yoder, D., Lightle, D., Dabney, S. (2011) - Universal soil loss equation and Revised Universal Soil Loss Equation. In: Handbook of Erosion Modelling, 1st edition. USA: R. Morgan e Mark Nearing. Blackwell Publishing Ltd. pp.137-167.
- Renard, K.; Foster, G.; Weesies, G.; Porter, J. (1991) - RUSLE Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, nº 46, pp. 30-33.
- Renard, K.; Foster, G.; Weesies, G.; Porter, J. (1991) – RUSLE - Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, V. 46, nº 1, pp. 30-33.
- Renard, K.G. e Freimund, J.R.(1994) – Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, pp. 287-306.
- Reneau, S.; Dietrich,W. (1990) - Depositional history of hollows on steep hillslopes, coastal Oregon and Washington. *National Geographic Research* 6, pp. 220-230.
- Ribeiro, A. et allia (1979) *Introduction à la Gèologie Général du Portugal*. Lisboa. Serviços Geológicos de Portugal.
- Ribeiro, J. (2000) – Caracterização genérica da região vinhateira do Alto Douro. DOURO – Estudos & Documentos, Vol. V, pp. 11-29.
- Richards, L. (1931) - Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, Vol.1, pp. 318–333.
- Richley, L. (2000) – Treatment of tunnel erosion in Tansmania. *Natural Resource Management*. Vol.3, No. 2, pp. 32-34.
- Rodríguez Rodríguez, A.; Guerra,J.A, Gorrín,S.P., Arbelo,C.D., and Mora,J.L.(2002) - Aggregates stability and water erosion in Andosols of the Canary Islands. *Land degradation & Development*, 13, pp. 515-523.
- Rodríguez, J.L.G. e Suárez, M.C.G. (2010) – Comparison of mathematical algorithms for determining the slope angle in Gis environment. *Aplicación de algoritmos matemáticos en la determinación de la inclinación de pendiente en un entorno SIG*. Aqua-LAC – Vol.2, No2, pp. 78-82.
- Rojo, L. (2008) - La Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación (RESEL). In: *Erosión y degradación del suelo agrícola en España* (A. Cerdá, ed.). Cátedra Divulgación de la Ciencia-Universitat de València, Valencia, pp. 127-148.
- Rouhi, A. e Wright, J. (1995) - Spectral implementation of a new operator splitting method for solving partial differential equations. *Comput. Phys.* 9(5), pp. 554-563.
- Roxo, M.J. (1994) - A acção antrópica no processo de degradação de Solos. A serra de Serpa e Mértola. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor no Ramo de Geografia e

- Planeamento Regional na Especialidade Ambiente e Recursos naturais. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Roxo, M.J. (2001) – O centro experimental de erosão do Vale Formoso, Mértola. Estudos experimentais de erosão hídrica dos solos. Metodologias de estudo de processos de erosão dos solos. Porto, pp.32-45.
- Sala, J.; Rubio, J.M.; Garcia Ruiz, J.M. (1991) [Edit.] (1991) - Soil erosion studies in Spain. Logroño: Geoforma Ediciones, 228p.
- Sánchez-André, R.; Sáncges-Carrilo, S.; Sánchez-López, A.; Benítez-Glilabert, M.; Carlos Alatorre, L. (2005) - Efectos del manejo del suelo en la infiltración en una aforestación con *Quercus ilex* L. en un área semiárida de agricultura de temporal, Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 1, pp. 3-19.
- Sanders, D. (2004) – Soil conservation. in In: Land Use, Land Cover and Soil Sciences, [Ed. Willy H. Verheye], in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK, [<http://www.eolss.net>]
- Santos, I. (2009) - Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica. Florianópolis: UFSC/CFH/GCN, tese de doutoramento em Geografia apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina, 187p.
- Schaetzl, R.; Anderson, S. (2005) - Soils Genesis and Geomorphology. Cambridge University Press, 817p.
- Schumm, S.A. (1979) – Geomorphic thresholds: the concept and its applications. Transactions of the Institute of British Geographers, Vol.4 pp. 485-515.
- Seixas, A.; Bateira, C.; Hermenegildo, C.; Pereira, S. (2006) - Definição de critérios de risco de ocorrência de movimentos de vertente na bacia hidrográfica da Ribeira da Meia Léguas – Actas das Jornadas sobre Terraços e Prevenção de Riscos Naturais, Palma de Maiorca, 11 p.
- Selby, M. (1982, 1993) - Hillslope Materials & Processes. New York, Oxford University Press, 264 p., 461p..
- Siefert, C.; Santos, I. (2012) - Mecanismos de geração de escoamento e áreas hidrologicamente sensíveis: Uma abordagem hidrogeomorfológica para a delimitação de áreas de preservação permanente. RA'E GA, nº24, Curitiba, Departamento de Geografia, pp. 227-257.
- Silva, V.C. (2003) - Cálculo automático do fator topográfico (LS) da EUPS - Pesquisa Agropecuária Tropical, pp.29-34
- Silva, W. (2011) Caracterização da cobertura superficial em encosta na cacia do Rio das Pombas, Guarapuava – PR: Bases Para Entendimento da Génese Erosiva em Túneis. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus Francisco Beltrão, 61 p.
- Silveira, C. T. (2010) - Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: Integração de atributos topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e redes neurais artificiais. Tese (Doutoramento em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 153 p.

- Silvério, M. (2000) - Erosão Hídrica dos Solos na Serra da Aboboreira, Porto, Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 220p.
- Simms, A.; Woodroffw, C.; Jones, B. (2003) – Application of RUSLE for erosion management in a coastal catchment, southern NSW. MODSIM: International Congress on Modelling and Simulation, volume Vol. 2, Integrative Modelling of Biophysical, Social and Economic Systems for Resource Management Solutions (Townsville, Queensland, Australia), pp. 678-683.
- Simões, H. (2013) - Modelação espacial da erosão hídrica do solo. Aplicação da Equação Universal da Perda de Solo (EUPS). Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica em Recursos Agro-Florestais e Ambientais, Especialização em Análise de Informação Geográfica. Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco, 188 p.
- Smith, T.R.; Menon, S.; Star, J.L.; Ested, J.E. (1987) - Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems. International Geographical Information Systems, vV. 1, Nonº. 1, pp. 13-31, 1987.
- Soares, L. (2008) - A importância das formações superficiais no âmbito dos processos de erosão hídrica e movimentos de vertente no NW de Portugal. Dissertação apresentada à Faculdade de Letras da Universidade do Porto para a obtenção do grau de doutor na especialidade de Geografia no ramo de conhecimento em Geografia Física, 887 p.
- Soares, L.; Bateira, C.; Pereira, S.; Seixas, A.; Hermenegildo, C.. (2010) -Processos de escoamento em terraços agrícolas do vale do Douro: comportamento hídrico de formações superficiais derivadas de metassedimentos e rochas granitoides (análise em diferentes secções de vertentes), Actas do XII Congresso Ibérico de Geografia, Porto.
- Soil erosion research methods. 2nd Ed. Soil and water conservation society and St. Lucie Press, FL. pp 127-156.
- Sousa, B, M e Sequeira, A. (1989) – Carta geológica de Portugal ma escala de 1/50000: noticia explicativa da folha 10 D: Alijó
- Sousa, F. (2007) – A demarcação pombalina à classificação de património mundial. População e sociedade, n.º 13, 2007, p. 19-30
- Sousa, M.; Cardoso, M.; Queirós, J.; Castro, R.; Guimaraens, D.; Magalhães, A. (s/d) – Douro património Mundial – preservação e formas de armação do terreno numa paisagem evolutiva e viva. 8p.
- Sousa, M.B. (1984) – Considerações sobre a estratigrafia do complexo xisto-grauváquico (CXG) e a sua relação com o Paleozóico inferior. Cuadernos Geología Ibérica, Vol. 9, Madrid, pp. 9-36.
- Sousa, M.B. (1985) – Perspectivas sobre os conhecimentos actuais do complexo xisto-grauváquico de Portugal. Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Min. Geol., No. 100, Coimbra, pp. 1-16.
- Souza, M.T. (2001) - Fundamentos para gestão dos recursos hídricos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 94p.
- Stabile, R. (2013) - Limites críticos topográficos de feições erosivas lineares em Piratininga (SP). Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geografia Física da

Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre, 102 p.

- Teixeira, N.; Guimarães, C. (2012) - Métodos de contenção e estabilização de processos erosivos e voçorocas no Brasil. Saberes Interdisciplinares, vol. 10, Instituto de Ensino Superior Presidente Tancredo Neves, 14 p.
- Tomás, P. (1992) - Estudo da erosão hídrica em solos agrícolas aplicação à região Sul de Portugal. Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 201 p.
- Tomás, P. (1997) - Modelos de previsão da erosão hídrica em solos agrícolas. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 260 p.
- Tomás, P.; Coutinho, M. (1993) – Erosão hídrica de solos em pequenas bacias hidrográficas. Aplicação da Equação Universal de Degradação dos Solos. Publ. CEHIDRO, nº7, 29 p.
- Toy, J.; Foster, R. (1998) – Guidelines for the Use of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Version 1.06 on Mined Lands Construction Sites, and Reclaimed Lands. 148 p.
- Trimble, S. (2012) – Historical agriculture and soil erosion in the Upper Mississippi Valley Hill Country. CRC Press, 290 p.
- Troeh, F. R. (1964) – Landform parameters correlated to soil drainage. Soil Sci. Soc. Am. Proc., Vol. 8 pp. 808-8012.
- Ubeda, X. e Sala Sanjaume, M. (1996) – “Cambios en la física del suelo e incremento de la escorrentia y la erosion tras un incendio forestal”, Cuadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe. Coruña: 4.ª reunion nacional de Geomorfologia, n.º 21, p.559-572.
- Ubeda, X. e Sala, M. (2001) – Chemical concentrations in overland flow from different forested areas in a Mediterranean Environment: burned forest at different fire intensity and unpaved road. Zeitschrift für Geomorphologie, 45(2), pp. 225-238.
- Uhde, L. (2009) - Sistema pedológico em um ambiente antropizado da depressão central do Rs. Tese de Doutoramento apresentada ao Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. 226 p.
- Vandekerckhove, L.; Poesen, J.; Oostwoud Wijdenes, D.; Figueiredo, T. (1998) - Topographical thresholds for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean. Catena, 33, pp. 271–292.
- Vandekerckhove, L.; Poesen, J.; Oostwoud Wijdenes, D.; Nachtergaele, J. Kosmas, C.; Roxo, M. J.; Figueiredo, T. (2000) - Thresholds for ephemeral gully initiation in Mediterranean Europe. Earth Surface Processes and Landforms 25, pp. 1201-1220.
- Vanwalleguem, T.; Poesen, J.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G. (2005) - Characteristics controlling the spatial distribution of soil piping erosion loess-derived soils. Geomorphology, Vol. 69, pp.76-91.
- Veloso, A. (2002) - Importância do estudo de vertentes. Geographia. Vol. 4, nº. 8, Universidade Fluminense, pp. 1-5.

- Vente, J. ; Poesen, J. (2005) - Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale Issues and Semi-quantitative Models. *Earth- Science Reviews*. V. 71, pp. 95-125.
- Verstraeten, G.; Poesen, J.; De Vente, J. Koninckx, X. (2003) - Sediment variability in Spain: a quantitative and semi-quantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology* 50, pp. 327-349.
- Vidal Torrado, P.; Lepsch, I. F.; Castro, S. S. (2005) – Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais húmidas. In: Vidal- Torrado, P.; Alleoni, L. R. F.; Cooper, M.; Silva, A. P.; Cardoso, E. J. (Ed.) *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 4, pp. 145-192.
- Vieira D.; Prats S.; Nunes J.; Shakesby R.; Coelho C.; Keizer J. (2014) - Modelling runoff and erosion, and their mitigation, in burned Portuguese forest using the revised Morgan–Morgan–Finney model. *Forest Ecology And Management*. 314, pp. 150-165.
- Ward, R.C. (1975) - *Principles of Hydrology*, McGraw-Hill, 2^a ed., Maidenhead.
- Ward, T. J. (1994) *Modelling of landslide materials to Streams*. US Department of the Interior. Washington, DC.
- Wheater, H.; Jakeman, A.; Beven, K. (1993) - Progress and directions in rainfall-runoff modelling. In: Jakeman, A.J., Beck, M.B., McAleer, M.J. (Eds.), *Modelling Change in Environmental Systems*. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 101–132.
- Williams, J.; Berndt, H. (1977) - Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 20, pp. 1100-1104.
- Wischmeier, W. ; Smith, D (1965) - Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. *Agr. Handbook No. 282*, U.S. Dept. Agr. Washington, D.C
- Wischmeier, W. ; Smith, D. (1978). - Predicting rainfall erosion losses - a guideline to conservation planning, *USDA Agric. Handbook 537*, Washington, D.C., 67p.
- World Reference Base for Soil Resources (FAO, 2014).
- Wysocki, D.; Schoeneberger, P.; Hirmas, D.; LaGarry, H.(2011) -*Geomorphology of soil landscap*. Handbook of soil science properties and processes, 2nd Ed. 26p.
- Yoder, D.; Porter, J.; Laflen, J.; Simanton, J.; Renard, K.; McCool, D.; Foster. G () - Cover-management factor (C). In: *RUSLE Revisited universal soil equation*. Cap. 5, 40p.
- Young, A. (1972) – *Slopes*. Edinburgh, Oliver & Boyd, 288 p.
- Young, R. G. (1960) - Dakota group of the Colorado plateau: *Association of Petroleum Geologists Bulletin*, V. 14, No. 2 pp. 156-194.
- Yura, G. (2010) – *Assessment of uncertainties of soil erosion and sediment yield estimates at two spatial scales in the upper Llobregat Basin (SE Pyrenees, Spain)*. PhD Dissertation. Barcelona, 256 p.
- Zhang, L.; O'Neill, A.L.; Lacey, S. (1996) - Modeling approaches to the prediction of soil erosion in catchments. *Environmental Software*, V. 11, pp. 123-133.

ANEXOS

1. MODELOS EMPÍRICOS

Quadro anexo i - Modelos empíricos considerando a escala de análise espacial e temporal, os processos de erosão contemplados e os seus principais objetivos. Adaptado de: Merrit et. al, 2003; Furegatti, 2012; Karydas et al., 2012.

MODELO	ESCALA ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL	PROCESSOS DE EROSIÃO	OBJECTIVOS/PARÂMETROS	REFERÊNCIA
USLE <i>Universal Soil Loss Equation</i>	Vertente Anual	Sulcos; Intersulcos	Estima a média anual de perda de solo baseada nos parâmetros de erosividade (precipitação) e erodibilidade (topografia, características do solo, uso do solo e práticas agrícolas).	Wischmeir & Smith, 1978 http://topsoil.nserl.purdue.edu/usle/
RUSLE <i>Revised Soil Loss Equation</i>	Vertente Anual	Sulcos; Intersulcos	Corresponde a uma revisão da USLE de forma a tornar o modelo mais operacional, incorporando algumas alterações na determinação dos parâmetros que incorporam a equação.	Renard et al., 1991 http://www.iwr.msu.edu/rusle/about.htm
SLEMSA <i>Soil Loss Estimation Model for Southern Africa</i>	Vertente Anual	Sulcos; Intersulcos	Modelo semelhante à USLE visando identificar as áreas com maior risco de erosão. Os parâmetros utilizados são o declive, propriedades do solo, vegetação, cursos de água, precipitação, vento, práticas agrícolas e de conservação e escoamento.	Stocking, 1981
SOLOSS <i>Australian Soil Loss Programme</i>	Continental; Regional; Vertente Mensal, Anual	Sulcos; Intersulcos	Modelo desenvolvido para adaptar e calibrar os factores da RUSLE às características do território Australiano.	Rosewell, 1993 http://members.ozemail.com.au/~pkinnell/SOLOSS.htm
SEDD <i>Sediment Delivery Distributed</i>	Bacias; Sub-bacias Evento; Anual	Não Menciona	Baseia-se na USLE apenas com diferenças nos parâmetros R e LS. No entanto, incorpora variação espacial dos factores (<i>distributed model</i>).	Ferro e Porto, 2000

2. MODELOS CONCRETUAIS

Quadro ii – Modelos Concretuais considerando a escala de análise espacial e temporal, os processos de erosão contemplados e os seus principais objetivos. Adaptado de: Merrit et. al, 2003; Furegatti, 2012; Karydas et al., 2012

MODELO	ESCALA ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL	PROCESSOS DE EROSÃO	OBJECTIVOS/PARÂMETROS	REFERÊNCIA
AGNPS <i>Agricultural NonPoint Source Pollution</i>	Bacias Evento	Intersulcos; Sulcos; Barrancos (<i>Gullies</i>)	Simula a produção de sedimentos em função do uso do solo, tipo de solo, práticas agrícolas e componentes hidrológicas. Foi inicialmente desenvolvido para avaliar a qualidade da água envolvida nos processos de escoamento em bacias de áreas rurais.	Young <i>et al.</i> , 1989 http://go.usa.gov/KFO
EMSS <i>Environmental Management Support System</i>	Bacias Diário	Modela apenas o escoamento e sedimentos em suspensão	Corresponde essencialmente a um <i>software que incorpora ferramentas distribuídas em 3 módulos principais</i> . Estima o escoamento diário e a carga de poluentes. Os dados de entrada para o modelo são a precipitação diária e a média mensal da evapotranspiração potencial.	Watson <i>et al.</i> , 2001
SWRRB <i>Simulator for Water Resources in Rural Basins</i>	Bacia Simulação contínua com base em dados diários	Menciona características dos canais como entrada	Desenvolvido para bacias rurais com três componentes principais: clima, hidrologia e sedimentação. Considera processos de escoamento superficial percolação, fluxo de retorno evapotranspiração, reservatório de armazenamento e sedimentação. É uma modificação do modelo CREAMS, estimando igualmente a predição de sedimentos utilizando os parâmetros do modelo RUSLE.	Williams <i>et al.</i> , 1985; Arnold <i>et al.</i> , 1990.
SEDNET <i>Sediment River Network</i>	Bacias ou áreas de dimensão diferenciada Anual	Considera vários processos em vertentes nomeadamente a formação de barrancos e margens fluviais	Funciona com um conjunto de <i>softwares</i> que simulam processos físicos de erosão, transporte e deposição de sedimentos. O modelo baseia-se nas características físicas da bacia e necessita de um número bastante reduzido de dados de entrada. Alguns autores integram-no no contexto dos modelos fisicamente baseados.	Presser <i>et al.</i> , 2001 http://www.toolkit.net.au/sednet
SWAT <i>Soil and Water Assessment Tool</i>	Sub-bacia ou Bacia Diário	Não considera a formação de sulcos, ravinas ou qualquer outro tipo processos lineares.	Incorpora vários módulos matemáticos que se baseiam nas características físicas da bacia hidrográfica. Os processos físicos associados ao movimento da água, movimento de sedimentos e crescimento de culturas são directamente modelados pelo SWAT.	Arnold <i>et al.</i> , 1998 http://swat.tamu.edu/software/wat-executables/
MMF <i>Morgan Morgan and Finney Model</i>	Vertente e Bacia Anual	Considera <i>gullies</i>	Neste modelo a desagregação do solo é descrita pela intensidade da precipitação, pelo factor K da USLE e pela quantidade de escoamento. O transporte de sedimentos é estimado através do declive, do escoamento e dos factores C e P da USLE. Alguns autores consideram-no um modelo misto, integrando aspectos dos fisicamente baseados e dos empíricos.	Morgan, 2001
HSPF <i>Hydrological Simulation Program - FORTAN</i>	Bacia Simulação contínua com base em séries de dados	Não menciona	Modelo de simulação hidrológica e qualidade da água, que incorpora um conjunto de módulos. Utiliza dados de precipitação, temperatura, radiação solar, uso do solo e práticas agrícolas. Desta simulação resulta a taxa de fluxo, carga de sedimentos e concentração de nutrientes e pesticidas.	Bicknell <i>et al.</i> , 1993 http://water.usgs.gov/software/HSPF/
HIDROLOG <i>Daily Conceptual Rainfall-Runoff Model</i>	Bacia	Não menciona	É um modelo hidrológico e de qualidade da água, que utiliza dados históricos de precipitação, temperatura, radiação solar, uso do solo e práticas agrícolas para simular a quantidade de escoamento, taxa de fluxo, carga de sedimentos e a concentração de nutrientes.	Porter e McMahon, 1971
SIMHYD <i>Simplified Hydrology Model</i>	Bacia Diário	Modela apenas a precipitação e o escoamento superficial	É uma versão simplificada do modelo HIDROLOG utilizado para simular o escoamento através dos dados de entrada da evapotranspiração potencial e da precipitação diária.	Chiew <i>et al.</i> , 2002
ACTMO <i>Agricultural Transport Model</i>	Bacia Evento	Não menciona	Prevê a concentração de químicos no fluxo e nos sedimentos movidos espacialmente através do solo.	Frere <i>et al.</i> , 1975

3. MODELOS DE BASE FÍSICA

Quadro anexo iii - Modelos de base física considerando a escala de análise espacial e temporal, os processos de erosão contemplados e os seus principais objetivos. Adaptado de: Merrit et. al, 2003; Furegatti, 2012; Karydas et al., 2012

MODELO	ESCALA ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL	PROCESSOS DE EROSAO	OBJECTIVOS/PARÁMETROS	REFERÊNCIA
Análise temporal definida				
GUEST <i>Griffith University Erosion System Template</i>	Parcelas Evento	Pode, ou não, considerar erosão em sulcos.	O modelo possui uma abordagem simultânea à previsão da erosão e deposição baseada num único evento.	Rose <i>et al.</i> , 1997
PERFECT <i>Productivity Erosion Runoff Functions to Evaluate Conservation Techniques</i>	Campo Diário	Não inclui sulcos nem gullies	Desenvolvido para simular o escoamento, erosão, balanço hídrico do solo, crescimento e produtividade das plantas. A perda de solo é estimada através de uma função do volume de escoamento, cobertura do solo, taxa de pico de escoamento, erosividade, erodibilidade, práticas de cultivo e características da bacia.	Littleboy <i>et al.</i> , 1989 http://www.apsim.info/How/Perfect/Perfect.htm
MIKE-11	Bacia Eventos únicos ou múltiplos	Não considera gullies.	Foi desenvolvido para simular as descargas e nível da água em rios mediante a precipitação incidente na bacia hidrográfica. É composto por vários módulos, nos quais se incluem alguns específicos para cálculo da erosão.	DHI, 2005 http://www.mikebydhi.com/Products/WaterResources/MIKE11.aspx
MEDRUSH <i>Medalus Desertification Response Unit She</i>	Bacias de grande dimensão Longo prazo	Considera sulcos, gullies e ribeiras	O modelo foi criado para incorporar a interação entre a taxa de processos de degradação do solo e as mudanças no solo e vegetação.	Kirkby <i>et al.</i> , 1995
SIRG <i>Surface Runoff, Infiltration, River, Discharge and Groundwater Flow</i>	Pequenas Bacias Evento	Não Menciona	Descreve a variação espacial e temporal da precipitação e do escoamento superficial, englobando igualmente aspectos ligados à infiltração e fluxo subsuperficial.	Yoo, 2002
GBHM <i>Geomorphology-Based Hydrology Simulation Model</i>	Vertente e Bacia	Não Menciona	Modelo desenvolvido para a simulação hidrológica tendo em conta as propriedades geomorfológicas da bacia hidrográfica. São considerados basicamente três parâmetros, mais precisamente a vegetação e cobertura da superfície, parâmetros de água no solo e por fim parâmetros dos canais dos rios.	Yang <i>et al.</i> , 1998
CONCEPTS <i>Conservational Channel Erosion and Pollutant Transport System</i>	Bacia Longo prazo	Considera sulcos, intersulcos e gullies	Simula o fluxo unidimensional instável, transporte de sedimentos, processos erosivos e transporte de poluentes em canais de bacias hidrográficas.	Langendoen, 2000 USDA (U.S Department of Agriculture)
ANSWERS <i>Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation</i>	Pequenas Bacias Evento	Considera sulcos para o parâmetro de rugosidade. Considera gullies	É um modelo baseado na análise de um único evento. Avalia os efeitos das práticas de uso do solo na erosão e produção de sedimentos.	Beasley & Huggins, 1981
LISEM <i>Limburg Soil Erosion Model</i>	Pequenas bacias (0.01 km ² a 100 km ²) Evento	Considera sulcos, intersulcos e gullies	Modelo espacialmente distribuído que simula a desagregação e deposição de sedimentos durante um único evento. Possui componentes hidrológicas, de erosão e deposição. Para além disso utiliza um algoritmo adicional para simular a erosão por gullies.	De Roo <i>et al.</i> , 1996 http://blogs.ugc.nl/lisem/
CREAMS <i>Chemicals , Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems</i>	Escala de campo (40-400 ha) Evento e longo prazo	Considera sulcos e gullies	Simula o escoamento, erosão e transporte de materiais durante e imediatamente após um único evento de chuva.	Knisel, 1985
EUROSEM <i>European Soil Erosion Model</i>	Escala de campo ou pequenas bacias Evento	Considera sulcos e canais, não considera ephemeral gullies	Baseia-se na modelação da fase de destacamento e transporte de sedimentos. Descreve os processos erosivos e a sua dinâmica. Contém vários módulos.	Morgan <i>et al.</i> , 1998; Quinton, 1994 http://www.es.lancs.ac.uk/people/johnq/EUROSEM.html
KINEROS <i>Kinematic Erosion Simulation</i>	Bacia Evento	Não considera gullies ; não separa explicitamente sulcos de intersulcos.	O modelo utiliza equações diferenciais que descrevem o escoamento superficial, transporte e deposição de sedimentos resolvidas pela técnica das diferenças finitas.	Smith <i>et al.</i> , 1995
WESP <i>Watershed Erosion Simulation Program</i>	Pequenas bacias Evento	Não considera sulcos.	O modelo utiliza a component hidrológica do modelo KINEROS e as técnicas de modelação do WEEP. Simula eventos de chuva e considera a erosão pelo impacto das gotas de chuva e pelo fluxo superficial.	Lopes, 1995
CASC2D-SED <i>CASc2-Dimensional SEDimentation</i>	Bacias (de 0.016 até 2300 km2) Evento	Não considera sulcos	Desenvolvido para determinar o hidrograma de escoamento gerado a partir de um evento de precipitação. O modelo possui um modulo de erosão/deposição para prever taxas de sedimentos.	Julien e Saghafian, 1991; Ogden, 1998 http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/CASC2D-SED%20Web%20site%20082506/CASC2D-SED-Home.htm

Quadro iv(Continuação) Modelos de base física considerando a escala de análise espacial e temporal, os processos de erosão contemplados e os seus principais objetivos. Adaptado de: Merrit et. al, 2003; Furegatti, 2012; Karydas et al., 2012

MODELO	ESCALA ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL	PROCESSOS DE EROSIÃO	OBJECTIVOS/PARÂMETROS	REFERÊNCIA
Análise temporal definida				
EGEM <i>Ephemeral Gullies Erosion Model</i>	Bacia Evento; anual	Considera apenas <i>gullies</i>	Foi desenvolvido especificamente para estimar as perdas de solo por barrancos efémeros. O modelo possui a componente hidrológica e de erosão e pode ser aplicado a um único evento ou para condições médias anuais.	Woodward, 1999
RORB <i>Runoff Routing Model</i>	Bacia	Não menciona	É um modelo que simula hidrogramas de escoamento através de processos de chuva-vazão.	Laurenson e Mein, 2010 http://eng.monash.edu.au/civil/research/centres/water/rorb/
TR-20 <i>Technical Report-20 Model</i>	Bacia Evento	Modela apenas o escoamento	Permite efectuar uma análise hidrológica da bacia hidrográfica. Estima o escoamento a partir de eventos de inundação, áreas de drenagem e tempos de concentração.	USDA Soil Conservation Service (SCS) http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/home/?cid=stelprdb1042924
WBNM <i>Watershed Bounded Network Model</i>	Bacia Evento	Não Menciona	É utilizado para a modelação hidrológica detalhada. Modela a precipitação, o escoamento superficial, o fluxo de canais e os reservatórios de armazenamento.	Boyd <i>et al.</i> , 1979, 1996; Rigby <i>et al.</i> , 1999
HEC-HMS <i>Hydrological Engineering Center – Hydrologic Modeling System</i>	Bacia Evento	Não considera sulcos nem <i>gullies</i>	Foi desenvolvido para simular processos hidrológicos em bacias dendríticas. Os elementos hidrológicos, conectados através de redes, simulam processos de escoamento. O software inclui vários procedimentos tradicionais da análise hidrológica, como a infiltração associada ao evento e hidrogramas unitários.	USACE (2008) http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/

Quadro v - Modelos de base física considerando a escala de análise espacial e temporal, os processos de erosão contemplados e os seus principais objetivos. Adaptado de: Merrit et. al, 2003; Furegatti, 2012; Karydas et al., 2012

MODELO	ESCALA ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL	PROCESSOS DE EROSIÃO	OBJECTIVOS/PARÂMETROS	REFERÊNCIA
Físicos Contínuos				
SHE/SHESED <i>Système Hydrologique Européen/Système Hydrologique Européen Sediment</i>	Vertente, Bacia e Canais Simulação contínua	Considera sulcos	Simula a erosão pelo impacto das gotas da chuva, escoamento superficial e transporte de sedimentos. Para canais simula a erosão no canal e o transporte de sedimentos a jusante.	Wicks & Bathrust, 1996
WEPP <i>Water Erosion Prediction Project</i>	Vertente ou Bacia Simulação contínua	Sulcos, interssulcos e <i>gullies</i>	É um modelo de simulação que estima o escoamento através da curva SCS ou pela equação de <i>Green Ampt</i> e a desagregação e transporte através dos parâmetros do declive, vegetação, tensão cisalhante, força de cisalhamento, rugosidade, matéria orgânica e massa das raízes.	Flanagan e Nearing, 1995 http://geowepp.geog.buffalo.edu/ ; http://forest.moscowfsl.wsu.edu/ufswapp/
ARNO <i>Arno River Model</i>	Bacia Simulação contínua	Não menciona	Este modelo incorpora a probabilidade espacial da capacidade de humidade do solo, bem como as diferentes áreas de contribuição que promovem a saturação do mesmo.	Todini, 1988
IHDM <i>Institute of Hydrology Distributed Model</i>	Vertente, bacia ou canal Simulação contínua	Não menciona	O modelo utiliza equações de fluxo e de superfície para modelar os teores de água de captação e os fluxos. A principal metodologia são as técnicas numéricas de aproximação e os principais parâmetros são as propriedades hidráulicas, propriedades dos materiais e geometria da bacia.	Morris, 1980
SIMWE <i>(Simulated Water Erosion)</i>	Vertente ou Bacia Simulação contínua	Considera ravinas e <i>gullies</i>	É um modelo bivariado que simula a erosão, transporte e deposição por escoamento superficial. A sua metodologia baseia-se essencialmente na combinação de dois módulos, nomeadamente o modelo hidrológico de fluxos sobre a terra e o modelo hidrológico de fluxo de sedimentos.	Mitas e Mitasova (1998)

Quadro anexo vi Modelos de base física considerando a escala de análise espacial e temporal, os processos de erosão contemplados e os seus principais objetivos. Adaptado de: Merrit et. al, 2003; Furegatti, 2012; Karydas et al., 2012

MODELO	ESCALA ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL	PROCESSOS DE EROSIÃO	OBJECTIVOS/PARÂMETROS	REFERÊNCIA
Espacialmente Distribuídos				
TOPMODEL <i>TOPOgraphy MODEL</i>	Bacia	Não considera sulcos nem <i>gullies</i>	Utilizado para a previsão de escoamento baseado na teoria das áreas de contribuição a partir de características topográficas do solo.	Beven e Kirkby, 1976, 1979; Beven, 1995
TOPOG <i>TOPOgraphy</i>	Vertente	Não inclui erosão linear	Modelo hidrológico e hidráulico utilizado para a determinação de linhas de fluxo baseado nas curvas de nível.	Dawes e Short, 1988; Dawes et al., 1997; CSIRO, 2000
MEFIDIS <i>Modelo de Erosão Distribuído e Físico</i>	Bacia de tamanho médio Eventos	Considera sulcos. Não simula explicitamente <i>gullies</i> mas considera um índice para estimar a perda de solo por <i>gullies</i> .	Permite a simulação a produção de escoamento, fluxo, desagregação do solo, transporte e deposição. Os parâmetros utilizados são: dados de precipitação, parâmetros do solo, uso e cobertura do solo, propriedades do canal, índice de humidade com o TOPMODEL.	Nunes et al., 2005

4. MODELOS SEMI-QUANTITATIVOS

Quadro anexo vii - Modelos Semi-quantitativos considerando a escala de análise espacial e temporal, os processos de erosão contemplados e os seus principais objetivos. Adaptado de: Merrit et. al, 2003; Furegatti, 2012; Karydas et al., 2012

MODELO	ESCALA ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL	PROCESSOS DE EROSIÃO	OBJECTIVOS/PARÂMETROS	REFERÊNCIA
Semi-quantitativo				
PSIAC <i>Pacific Southwest Inter-Agency Committee</i>	Bacia (maior que 30 km ²) Anual	Considera sulcos, <i>gullies</i> e ribeiras	Estima a taxa média anual de produção de sedimentos através de parâmetros individuais: geologia, solo, clima, escoamento, topografia, cobertura do solo, uso do solo, erosão e transporte de sedimentos. Estes parâmetros são subdivididos em classes, às quais são atribuídos <i>scores</i> .	Psiac, 1968
FSM <i>Factorial Scoring Model</i>	Bacia Anual	Considera sulcos, <i>gullies</i> e ribeiras	Estima a produção anual de sedimentos e consiste na aplicação de cinco factores: topografia, cobertura vegetal, <i>gullies</i> litologia, geometria da bacia.	Verstraeten et al., 2003
VSD <i>Vegetation Surface Material Drainage Density</i>	Bacia Anual	Considera sulcos, <i>gullies</i> e ribeiras	Este modelo foi criado para obter a relação entre a produção de sedimentos e as características da bacia, designadamente a densidade do coberto vegetal, a erodibilidade do solo e a densidade de drenagem.	Jinfa e Xiuhua, 2004
GAVRILOVIC	Bacia	Considera sulcos, <i>gullies</i> e ribeiras	Desenvolvido para estimar a erosão e a deposição de sedimentos. Os factores usados são a protecção do solo, a erodibilidade e o tipo e a severidade da erosão. Para além disso considera a precipitação anual, o declive e a área da superfície da bacia considerada.	Gravilovic, 1976
EHU <i>Erosion Hazard Unit</i>	Bacia	Considera sulcos	É uma versão modificada do modelo SLEMSA e utiliza os dados de precipitação para estimar a energia da chuva e combina o índice de erodibilidade do solo para calcular um risco de erosão.	Stocking and Elwell, 1973
CORINE <i>Coordination of Information on the Environment</i>	Bacia	Considera sulcos	O principal objectivo é determinar o risco de erosão e é baseado nos princípios da USLE e combina seis parâmetros.	EEA, 1992
CSSM <i>Coleman and Scatena Scoring Model</i>	Bacia	Considera sulcos, <i>gullies</i> e ribeiras	Este modelo foi desenvolvido para localizar áreas de grande desagregação de sedimentos e estabelecer uma avaliação qualitativa da contribuição das mesmas na erosão e transporte de sedimentos.	Coleman e Scatena, 1996
FKSM <i>Fleming and Kadhim Scoring Model</i>	Bacia	Considera sulcos	É um modelo que se baseia na atribuição de pontuação (de 1 a 5) aos factores que influenciam o risco de erosão, nomeadamente o declive, erosividade, erodibilidade, cobertura do solo e uso do solo.	Fleming e Kadhim, 1982
WSM <i>Wallingford Scoring Model</i>	Pequenas bacias	Considera sulcos, <i>gullies</i> e ribeiras	Foi desenvolvido para prevêr a desagregação de sedimentos de pequenas bacias. Os factores qualitativos analisados são: o tipo de solo, feições erosivas, vegetação. Os factores quantitativos são: declive da bacia, área de bacia e precipitação média anual.	Lawrence et al., 2004