

Avaliação da ameaça de erosão hídrica na ilha da Madeira - Portugal

Miguel de Azevedo Coutinho, Rodrigo Proença de Oliveira, Carla Rolo Antunes & Cláudia Tomás Caetano

To cite this article: Miguel de Azevedo Coutinho, Rodrigo Proença de Oliveira, Carla Rolo Antunes & Cláudia Tomás Caetano (2019) Avaliação da ameaça de erosão hídrica na ilha da Madeira - Portugal, Ribagua, 6:1, 87-100, DOI: [10.1080/23863781.2019.1642594](https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1642594)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1642594>



© 2019 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group on behalf of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR).



Published online: 21 Aug 2019.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 117



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Avaliação da ameaça de erosão hídrica na ilha da Madeira - Portugal

Miguel de Azevedo Coutinho^a, Rodrigo Proença de Oliveira^a, Carla Rolo Antunes^b and Cláudia Tomás Caetano^a

^aDepartamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal;

^bDepartamento de Ciências da Terra, do Mar e do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, Faro, Portugal

RESUMO

Na estimativa da erosão hídrica na ilha da Madeira aplicou-se a Equação de Wischmeier. Recorreu-se a relações para estimar a erosividade (R); foi adequado o Índice Modificado de Fournier e relação IMF/R. cartografada a erosividade os restantes parâmetros resultaram da metodologia. IMF varia entre 81.0–465.0 mm. A equação $R = 1.365 IMF1.408$ estima a erosividade anual precipitação, com dados de Funchal-Observatório, sul de Portugal e valores da literatura, obtendo-se $R \approx 2\,964 \text{ MJ mm h}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, variando entre 660–8515. Erosão média é $28 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, excedendo 100 em >4.9% da área. A ameaça de erosão adveio da divisão do volume de solo dos horizontes mobilizáveis, pela erosão anual. O resultado -número de anos- que ocorre a perda do solo de cobertura. Apesar do tempo para esgotamento do solo, ser >20 000 anos, a ameaça de erosão, alta e muito alta, é relevante. Estas ameaças (depleção <100 anos) ocorrem em 263 km² (35.6%); na ameaça muito alta (depleção em <10 anos) a área é $\approx 40 \text{ km}^2$ (5.4%). Encostas com declives muito elevados estão associadas a ameaças altas (ou muito altas). Efetuou-se a análise da precipitação 20 de Fevereiro, obtendo-se um período de retorno superior a 100 anos.

PALAVRAS CHAVE

Degradação da terra; risco de erosão; precipitação; erosividade da chuva; equação universal da perda de solo (revista)

1. Introdução e enquadramento

A ilha da Madeira possui uma orografia bastante acid-entada, dominada, no centro da ilha, por montanhas de grande elevação e declive, genericamente rodeadas por ravinas profundas. A existência de zonas com altitudes muito elevadas favorece a ocorrência de precipitação orográfica. A precipitação anual média é de 1384 mm. A rede hidrográfica encontra-se fortemente encaixada com trechos retilíneos em extensões significativas. A orientação geral dos cursos de água principais é radial e mantém o alinhamento praticamente desde a nascente até à foz. Quanto à geomorfologia, caracteriza-se por relevo intenso, onde cerca de 4% da superfície se eleva até aos 1800 m, encontrando-se 25% a altitudes superiores a 1000 m. Quanto à geologia, é fundamentalmente magmática, sendo constituída por diversas unidades geológicas, das quais se destacam os complexos vulcânicos, calcários marinhos, depósitos conglomeráticos e depósitos de vertentes [1]. Os solos dominantes são de material originário basáltico, provenientes de uma geologia monotonamente basáltica, em que os grupos dominantes principais são Andosolos, Phaeozems, Cambissolos e Vertissolos [2].

A avaliação da ameaça e risco de erosão hídrica do solo é fundamental no planeamento de uso e ocupação territorial, no combate à degradação da terra e na

definição de políticas de gestão de recursos naturais, designadamente, do uso do solo. A gravidade das ameaças depende da magnitude e intensidade dos processos de erosão hídrica e de outros parâmetros, destacando-se a espessura do solo, a meteorização das rochas e a coesão dos sedimentos superficiais.

A tempestade que ocorreu na ilha da Madeira a 20 de Fevereiro de 2010, associada a intensos aluviões (debris flows), acarretou grande devastação (com perda de mais de 50 vidas) e evidenciou a importância dos fenómenos erosivos. Na Madeira, o termo aluviões é utilizado como sinónimo de escoamentos torrenciais / correntes de detritos.

Neste enquadramento a Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira (SRES) promoveu o Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira (EARAM) que apontava para os principais objectivos gerais: (i) caracterização fenomenológica do evento de 20 de Fevereiro; (ii) avaliação dos riscos associados aos aluviões (torrentes de detritos) ocorridos na Ilha; e (iii) estabelecimento de princípios gerais de orientação para as intervenções de prevenção e protecção.

Na 1ª fase do referido estudo (EARAM1) a área abrangida compreendeu as bacias hidrográficas mais afectadas pelo referido acontecimento – ribeiras de

João Gomes, Santa Luzia e São João, do concelho do Funchal, e as ribeiras da Ribeira Brava e Tabua, do concelho da Ribeira Brava. A 2ª fase, EARAM2 [3] complementou estes trabalhos e teve os seguintes objectivos estratégicos: (i) aprofundar o conhecimento sobre o fenómeno dos aluviões, melhorar a metodologia para avaliação do risco e contribuir para a implementação da Directiva da EU sobre cheias e inundações (Directiva 2007/60/CE), na Região Autónoma da Madeira; (ii) estender a avaliação do risco a toda a ilha da Madeira; (iii) conceber o sistema de previsão e aviso de aluviões; (iv) avaliar os condicionamentos sociais na prevenção do risco de aluviões; e, (v) desenvolver acções de divulgação pública e de formação sobre este tipo de risco.

Neste artigo dá-se nota, principalmente, dos resultados da 2ª fase do Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira (EARAM2), projecto desenvolvido para o Governo Regional da Madeira pelo consórcio constituído pelo Instituto Superior Técnico (IST), a Associação para o Desenvolvimento do IST (ADIST) e a Universidade da Madeira (UMa) [3].

O estudo foca a avaliação dos riscos associados à erosão hídrica distribuída, como contributo para a compreensão das torrentes de detritos ocorridos na Ilha da Madeira. Como objectivo principal, procurou-se obter a estimativa e distribuição de valores de perda de solo e estabelecer, consequentemente, os níveis respectivos de ameaça, na totalidade do território da ilha da Madeira; adoptou-se a metodologia de Wischmeier/USLE (Equação Universal da Perda de Solo), para este fim, com adaptações e melhoramentos introduzidos pela *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) [4]. Este procedimento tem vindo a ser utilizado para a previsão da erosão do solo em amplos territórios [5–8].

Deste modo, foi necessário proceder à elaboração de cartografias intermédias e de suporte, nomeadamente um modelo digital do terreno, para obter as distribuições dos diferentes parâmetros contemplados na metodologia. Assim, foram elaboradas as cartografias: da erosividade de precipitação; da erodibilidade dos solos; do factor fisiográfico; do factor de coberto vegetal e, do factor de prática agrícola.

Devido à escassez de dados de precipitação subdiária e subhorária, necessários para obter estimativas rigorosas da erosividade da precipitação, considerou-se indispensável efectuar um estudo rigoroso e estabelecer equações de regressão entre o Índice Modificado de Fournier e o factor de Wischmeier (R), com base, principalmente, no posto de Funchal-Observatório e em postos do sul de Portugal e através de relações disponíveis na literatura [9–11].

Foi ainda decidido aprofundar-se a análise relativa à avaliação da probabilidade de ocorrência do acontecimento erosivo de 20 de Fevereiro de 2010, tanto em termos da probabilidade de ocorrência da precipitação como em termos da sua erosividade.

2. Metodologia da avaliação da erosão hídrica

2.1. Equação Universal da Perda de Solo (USLE/RUSLE)

A análise e estimativa dos níveis de incidência da erosão hídrica foram baseadas na aplicação da metodologia de Wischmeier/USLE – Equação Universal da Perda de Solo [12], com os ajustamentos e adaptações introduzidos pela RUSLE – Equação Universal da Perda de Solo Revista [4] e com as condições compatíveis com os dados disponíveis.

Nas metodologias da USLE e RUSLE, cada parâmetro interveniente na modelação do processo erosivo é traduzido por um factor; a perda de solo obtém-se pela equação:

$$E = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

onde,

- E – Valor calculado da perda de solo ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$);
- R – Factor de erosividade da precipitação ($MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$);
- K – Erodibilidade do solo ($t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$);
- LS – Factor fisiográfico (-);
- C – Factor do coberto vegetal (-);
- P – Factor de prática agrícola (-).

De forma resumida, referem-se aspectos relativos a cada um dos parâmetros da equação. Esta metodologia encontra-se desenvolvida, pormenorizadamente, no relatório ERAM2 [3].

2.1.1. Erosividade da precipitação (R)

No cálculo do factor de erosividade da precipitação – R – são necessários registos udométricos de discriminação elevada. A erosividade da precipitação – R_i – para uma dada duração (período – i), de um conjunto de acontecimentos chuvosos (m), em $MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot ha^{-1}$, obtém-se pela aplicação da Equação (2). Os períodos (i), de referência, são geralmente anuais

$$R_i = \sum_{j=1}^m E \times I_{30j} \quad (2)$$

O valor do índice EI_{30} (erosividade de Wischmeier – R), para cada acontecimento (chuvada j), é obtido pela multiplicação da energia cinética da precipitação pela intensidade máxima da precipitação, de duração de 30 minutos ($I_{30máxj}$), ou seja $E \times I_{30máxj}$. Expressa-se,

em termos específicos, por unidade de área e tempo, $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, através da Equação (3):

$$E \times I_{30j} = \left(\sum_{k=1}^q e_k \times p_k \right) \times I_{30\text{máx}} \quad (3)$$

A energia cinética da precipitação – e_k – para um período – k – de intensidade de precipitação constante (I_k) e com precipitação p_k , obtém-se pelas Equações (4) e (5) [13]:

$$e_k = 0.119 + 0.0873 \times \log_{10} I_k, \text{ para } I_k \leq 76 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1} \quad (4)$$

$$e_k = 0.263, \text{ para } I_k > 76 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1} \quad (5)$$

Em períodos de características médias, usualmente normais climáticas, a erosividade anual média resulta da aplicação da seguinte expressão (Equação 6),

$$R_{\text{méd}} = \frac{\sum_{j=1}^n R_i}{n} \quad (6)$$

em que,

$R_{\text{méd}}$ – Erosividade anual média ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$);

R_i – Erosividade no ano i ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$);

n – Número de anos do período.

2.1.2. Erodibilidade dos solos (K)

O factor de erodibilidade do solo – K – é expresso através do valor da perda de solo por unidade de erosividade da precipitação, num talhão de referência (9% de declive e 22.13 m de comprimento, cama de sementeira, mobilizado no maior declive). É contabilizado em peso por unidade de factor de erosividade, ou seja, $\text{t}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$.

Para quantificar a erodibilidade do solo é possível recorrer-se a um monograma ou aplicar a expressão apresentada seguidamente (Equação 7), tendo esta sido aplicada no presente estudo,

$$K = \frac{2.1 \times M^{1.14} \times (12 - Mo) + 3.25 \times (\alpha - 2) + 2.5 \times (\beta - 3)}{759.3} \quad (7)$$

onde,

M – [limo e areia muito fina (%)] x [100 – argila (%)];

Mo – Matéria orgânica (%);

α – Código de classe de estrutura do solo (1 a 4, ou seja, Granular muito fina a Compacta);

β – Código de classe de permeabilidade do solo (1 a 6, ou seja, Rápida a Muito lenta).

2.1.3. Factor fisiográfico (LS)

O factor fisiográfico – LS – obtém-se pela composição dos factores de comprimento e de declive das encostas.

O factor de comprimento – L (adimensional) – corresponde à relação entre os comprimentos da encosta e do talhão de referência de Wischmeier (22.13 m). Relativamente ao factor de declive – S (adimensional) – resulta da relação entre os declives da encosta e do talhão de referência (9%).

Para o cálculo do factor de comprimento – L – aplica-se a Equação (8),

$$L = \left(\frac{\lambda_e}{22.13} \right)^m \quad (8)$$

em que,

λ_e – Comprimento da encosta (m);

m – Expoente – varia em função do declive da encosta (-).

O expoente – m – varia entre 0.2 e 0.5, para encostas com declive igual ou inferior a 1% e igual ou superior a 5%, respectivamente.

No cálculo do factor de declive – S – aplicaram-se as Equações (9) e (10),

$$S = 10.8 \times \sin \theta + 0.03, \text{ para } s \leq 9\% \quad (9)$$

$$S = 16.8 \times \sin \theta - 0.03, \text{ para } s > 9\% \quad (10)$$

sendo:

θ – Ângulo da encosta com a horizontal, em $^\circ$ (graus de ângulo);

s – Declive da encosta, em %.

2.1.4. Factor de coberto vegetal (C)

O factor do coberto vegetal – C (adimensional) – traduz a relação entre a perda de solo para o coberto vegetal existente e o valor na situação de referência (alqueive verde). O parâmetro varia entre 0.0 e 1.0, correspondentes, respectivamente, a culturas que promovem a máxima cobertura do terreno (área protegida 100%) e à inexistência de cultura e protecção do solo (área protegida 0%). No cálculo deste factor é necessário ponderar a cobertura do solo, ao longo do ano considerando os calendários agrícolas, as fases vegetativas e a incidência da erosividade ao longo do ano. Em cobertos florestais é importante considerar os diferentes estratos do coberto e o efeito da interceptação da precipitação e gotejo sobre o solo [14,15].

2.1.5. Factor de prática agrícola (P)

O factor de prática agrícola (medidas de uso e de protecção do solo) – P (adimensional) – traduz a relação entre as práticas agrícolas, de uso, as medidas de protecção ou conservação efectivas e as condições de referência – sem medidas de protecção e com as lavouras realizadas segundo o maior declive das

encostas. O factor P varia entre 0.0 e 1.0; com o valor 0.0 para a máxima protecção e estruturação (terraços de nível), e 1.0 com protecção inexistente e lavouras no sentido do declive do terreno.

2.2. Estimativa da erosão hídrica distribuída

A quantificação da erosão hídrica distribuída resultou do cálculo dos diferentes factores, anteriormente mencionados. Foi dada relevância particular ao procedimento para a estimativa da erosividade de precipitação de Wischmeier e ao estabelecimento da sua distribuição espacial.

3. Factor de erosividade da precipitação – R

No estudo de base, efectuado para o Governo Regional da Madeira, foi elaborado um levantamento da rede meteorológica da ilha da madeira e da sua operacionalidade. A rede de postos udométricos e de estações meteorológicas existentes na Madeira permite uma boa cobertura do território; no entanto, alguns postos são de instalação recente, e são geridos por diferentes entidades. Na maioria dos casos os registos não apresentam discretização subdiária, não existindo análises de qualidade e de desempenho da rede nem avaliações dos respectivos níveis de rigor e consistência. Na Figura 1 apresenta-se a localização dos postos e estações meteorológicas existentes na Madeira com a delimitação das bacias hidrográficas correspondentes à 1ª fase do estudo.

Devido à escassez de registos de precipitação subdiária e subhorária (discretização de pelo menos 5 ou 10 minutos), em séries longas de registos (≈ 30 anos), necessários para efectuar estimativas rigorosas da erosividade da precipitação, foi necessário efectuar

uma análise pormenorizada e estabelecer equações de regressão entre o Índice Modificado de Fournier e o parâmetro de Wischmeier (R), com base, principalmente, no posto do Funchal e em postos do sul de Portugal (postos em que estes valores estivessem determinados) e, ainda, através de relações disponíveis na literatura [9–11].

Foi igualmente necessário, avaliar as relações entre as precipitações e as intensidades de precipitação, com diferentes durações. Foram obtidas estimativas da erosividade de precipitação, através de equações disponíveis na bibliografia [9,10,16–18], de âmbito regional e em base anual, bem como, outras relações entre R e o Índice Modificado de Fournier (IMF) [19]. Procedeu-se, ainda, à análise das precipitações extremas para o posto Funchal-Observatório, de acordo com a metodologia preconizada pelo SNIRH [20].

A Equação (11) resultou de ajustamento e generalização das referidas relações, com base em dados adicionais obtidos para o posto do Funchal (período mais alargado), em postos do sul de Portugal e em dados obtidos para a ilha da Sicília [11]. No cálculo do factor (R) e da sua distribuição na ilha, foram consideradas precipitações anuais em 26 postos, correspondendo, a um período de anos hidrológicos simultaneamente disponíveis (1949/50 a 1979/80).

$$R_2' = 1.365 \times IMF^{1.408} \quad (11)$$

Em que:

R_2' – Erosividade média anual ($MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$);

IMF – Índice Modificado de Fournier (mm).

Os valores de Precipitação anual média e de IMF estimados, nos 26 postos principais, apresentam-se no Quadro 1, indicam-se, ainda, a Erosividade da



Figura 1. Distribuição espacial das estações de monitorização existentes na Madeira.

precipitação R de alguns postos que estiveram na base da obtenção da carta de erosividade de precipitação (Figura 4). Na orla litoral os valores foram ajustados, por interpolação, por dados obtidos da carta de precipitação do Plano Regional da Água da Madeira [21].

No estabelecimento da cartografia da precipitação anual e do Índice Modificado de Fournier ensaiaram-se diferentes técnicas do software ArcMap: krigagem, cokrigagem e idw (Inverse distance weighting). Na Figura 2 apresenta-se o mapa de distribuição da precipitação anual média, obtido por cokrigagem, metodologia que se afigurou mais robusta e consistente.

A distribuição do IMF para toda a ilha da Madeira foi obtida utilizando a mesma metodologia. Aplicando-se a Equação (11) as erosividades foram obtidas dos valores de IMF , obtendo-se a distribuição superficial do parâmetro erosividade. Para a estimativa da erosão hídrica (E) foram adoptados os valores de erosividade da precipitação resultantes da expressão R_2 (Equação 11).

Na Figura 3 apresenta-se o gráfico da relação da erosividade da precipitação (R) e o Índice Modificado de Fournier (IMF). Evidencia-se que a equação 3.1. adoptada se ajusta melhor aos valores de erosividade calculados, para os dados processados.

Na Figura 4, obtida a partir das cartas de precipitação anual média e do Índice Modificado de Fournier, apresenta-se a cartografia da erosividade de precipitação, para a ilha da Madeira

4. O acontecimento de 20 de fevereiro de 2010

4.1. Precipitações extremas

A análise da precipitação na região abrangida no estudo da 1ª Fase foi efectuada com maior pormenor do que para a 2ª Fase, na totalidade da Ilha, designadamente, no posto Funchal-Observatório, com cerca de 75 anos de registos de precipitações diárias, de modo a poder estabelecer o enquadramento da precipitação no acontecimento de 20 de Fevereiro de 2010.

Efectuou-se, primeiro, a análise do acontecimento extremo com base nos registos com discretização de 10 minutos. No Quadro 2 apresentam-se as precipitações máximas com diferentes durações, que ocorreram em torno do evento catastrófico de 20 de Fevereiro de 2010 no posto do Funchal. Em itálico, indicam-se os valores relativos a durações subdiárias.

Foi efectuada, ainda, a análise estatística das precipitações diárias máximas anuais com as durações de um a quatro dias e estabelecidas as respectivas curvas de possibilidade udométricas (PDF), para períodos de retorno de 20 a 1000 anos.

Quadro 1. Precipitação anual média (mm), no período de 1949/50 a 1979/80, IMF (mm), para os 26 postos principais e Erosividade R (Wischmeier) para alguns dos postos considerados.

Posto	Precipitação anual média (mm)	IMF (mm)	R (MJ·mm·h ⁻¹ ·ha ⁻¹ ·ano ⁻¹)
Areeiro antigo	2955.2	495.7	8511.3
Bica da Cana – IGA	2984.8	464.6	7769.3
Camacha	1539.0	268.7	3594.5
Canhas	811.0	147.0	1537.5
Caniçal	733.8	128.6	1273.2
Cascalho	1863.8	262.2	
Curral das Freiras (Igreja)	1957.6	392.8	6133.1
Encumeada de S. Vicente	2723.2	470.6	7910.2
Fajã da Ovelha	424.9	80.8	
Funchal – Observatório – IM	628.4	128.9	1277.0
Lugar de Baixo – JG	611.6	121.6	1177.0
Montado do Pereiro	2357.9	409.6	6507.3
Ponta Delgada	1160.1	178.9	2027.3
Ponta do Pargo	997.7	149.9	
Porto Moniz (Feira do Gado)	1340.5	207.4	2495.6
Prazeres – EMA	595.4	116.7	
Queimadas	2263.8	344.4	5096.1
Ribeira Brava	675.4	119.5	
Ribeira do Alecrim	2748.8	218.8	
Ribeiro Frio	2404.3	406.5	6436.4
S. Jorge – ETA	2577.8	360.8	
Sanatório	873.1	172.1	1918.9
Santa Catarina	658.1	108.4	
Santana	1432.0	226.7	2828.8
Santo António (Trapiche)	991.0	199.5	2363.3
Santo da Serra – IGA	1806.3	296.9	4135.8

Observou-se que, neste ano, o mês de Fevereiro (2010) registou o valor mais elevado de precipitação ao longo de todo o período de registos, totalizando cerca de 465 mm de precipitação, no posto do Funchal. Assinala-se, ainda, que desde o final do mês de Janeiro tinham já ocorrido precipitações acumuladas de valores semelhantes mas que não tiveram efeitos associados de impacte equivalente, em termos de escoamentos e danos provocados. No Quadro 3 apresenta-se a sucessão de cinco precipitações máximas, com durações até quatro dias, que ocorreram desde o final do mês de Janeiro de 2010.

Atente-se a que os valores de precipitação diária de 110.0 mm ou superiores, correspondem aos cinco maiores valores registados no período (75 anos) de valores disponíveis para o posto do Funchal e que os valores de dois dias de mais de 150.0 mm, correspondem aos quatro mais elevados desse mesmo período. Constatou-se ainda que os acontecimentos erosivos extremos associados às

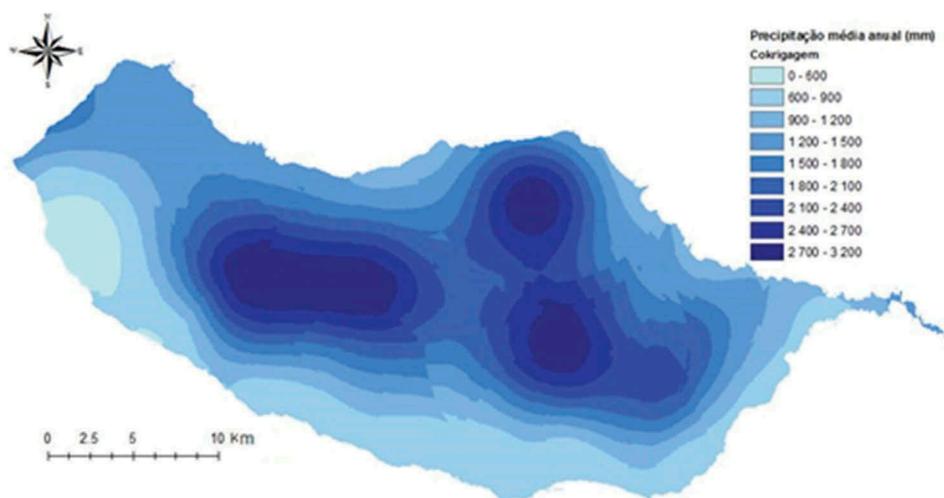


Figura 2. Carta da precipitação anual média (1949/50 a 1979/80), em mm – (cokrigagem).

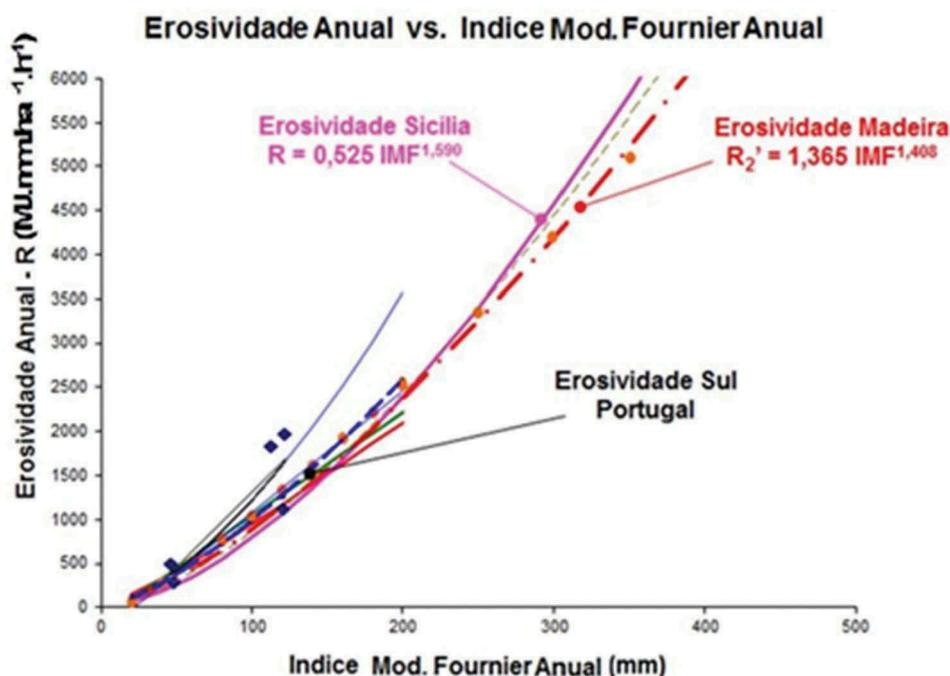


Figura 3. Relação entre erosividade anual e *IMF*, adoptada para a ilha da Madeira.

chuvadas (definidas segundo a metodologia de Wischmeier) têm durações situadas entre as 18 e 24 h, apresentando maior correlação com os valores da precipitação máxima com duração de dois dias, em vez dos valores da precipitação diária. No Quadro 3 os valores assinalados a encarnado são os que compreendem ao fenómeno torrencial associado à ocorrência dos aluviões ocorridos de 19 para 20 de Fevereiro de 2010.

Nas Figuras 5 e 6 observam-se o hietograma da precipitação e o histograma da erosividade da precipitação, para o acontecimento erosivo de 20 de

Fevereiro de 2010 (limitado segundo a metodologia de Wischmeier), com registos (sinópticos) a 19 e 20 de Fevereiro. Nos gráficos a escala do tempo, nas abcissas, apresenta o formato dia:hora.

De acordo com a metodologia de Wischmeier, para o estabelecimento de acontecimentos erosivos de precipitação (chuvadas erosivas), o episódio teve início no dia 20 de Fevereiro às 03:00 h e terminou às 23:10 h, desse mesmo dia; nos registos sinóticos a chuvada erosiva foi dividida pelos dias 19 e 20 e, os valores de precipitação registados foram, respectivamente, 51.8 e 99.4 mm (Quadro 3). A precipitação

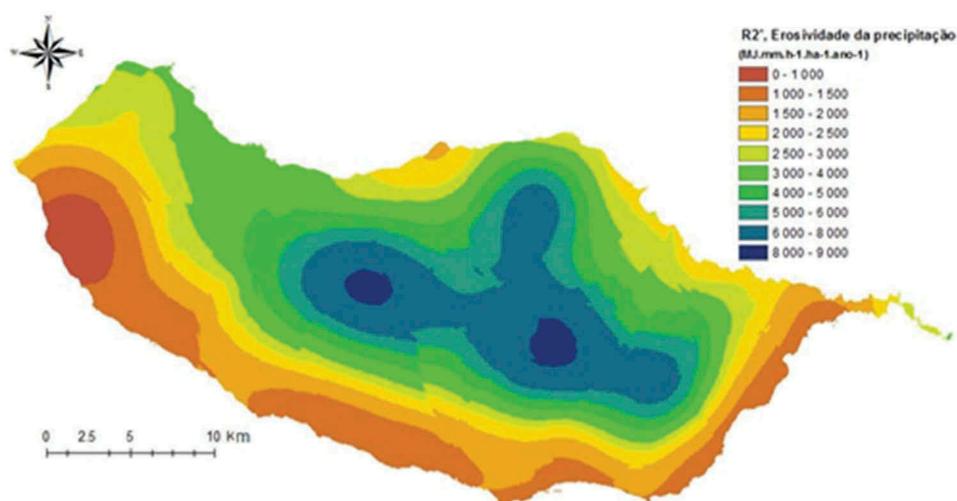


Figura 4. Carta da erosividade da precipitação, equação 11 (R_2).

Quadro 2. Precipitações máximas com diferentes durações, registadas no acontecimento catastrófico de 20 de Fevereiro de 2010.

Duração			Precipitação	
(dia)	(hora)	(min)	(mm)	(mm·h ⁻¹)
0.007	0.17	10	11.0	66.0
0.010	0.25	15		
0.021	0.50	30	31.4	62.8
0.042	1	60	51.3	51.3
0.125	3	180		
0.250	6	360	115.0	19.2
0.500	12	720	138.4	11.5
1.000	24	1440	144.3	6.0
1	24	1440	99.4	6.3
2	48	2880	151.2	3.2
3	72	4320	187.3	2.6
4	96	5760	191.7	2.0

total do acontecimento foi de 147 mm com uma intensidade máxima média em 30 minutos, $I_{30} \approx 62.8 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

Como se pode observar na Figura 6, mais de 98% da erosividade da precipitação ocorreu até cerca das 17:00 h do dia 20 de Fevereiro, mais de 85% até cerca das 13:00 h e 76.8% até às 11:00 h. A erosividade total resultou do somatório das energias cinéticas, correspondentes aos incrementos de 10 minutos erosivos

da precipitação, multiplicados pelo valor da intensidade máxima em 30 min, tendo-se obtido para o acontecimento, segundo a metodologia de Wischmeier, o factor de erosividade, $R = 2\,145 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Equações 2 e 3).

Ainda, no âmbito da caracterização dos acontecimentos extremos, foi efectuada a análise para o posto Funchal-Observatório, da probabilidade de ocorrência de sucessivos dias de precipitações máximas para a totalidade do período de registos; o melhor ajustamento para os valores observados foi obtido por uma lei de distribuição de Pearson (tipo III).

Apresentam-se, no Quadro 4, os períodos de retorno e precipitações correspondentes às durações de 1 a 4 dias. Seguidamente, no Quadro 5, indicam-se os valores dos parâmetros **a** e **b** das respectivas curvas de possibilidade udométricas (PDF), $P = a \cdot t^b$, determinadas.

Observa-se que as precipitações erosivas extremas, correspondentes a chuvadas delimitadas segundo a metodologia de Wischmeier, ocorrem na maior parte dos casos, em dias sucessivos, com duração próxima ou superior ao dia, apresentando uma melhor correlação com as precipitações máximas de dois dias seguidos. No acontecimento erosivo de 20 de Fevereiro, com

Quadro 3. Precipitações máximas acumuladas, de durações até quatro dias, ocorridas desde o final do mês de Janeiro de 2010.

Precipitações máximas (mm) – (durações/dia de início)								
1		2		3		4		
(ordem)	(dia)	(mm)	(dia)	(mm)	(dia)	(mm)	(dia)	(mm)
1	01.fev.10	111.0	01.fev.10	152.1	17.fev.10	187.3	17.fev.10	191.7
2	20.fev.10	99.4	19.fev.10	151.2	31.jan.10	163.2	18.fev.10	189.9
3	19.fev.10	51.8	31.jan.10	122.1	19.fev.10	155.6	30.jan.10	172.9
4	02.fev.10	41.1	20.fev.10	103.8	01.fev.10	152.1	19.fev.10	168.0
5	17.fev.10	36.1	17.fev.10	87.9	30.jan.10	131.8	31.jan.10	163.2

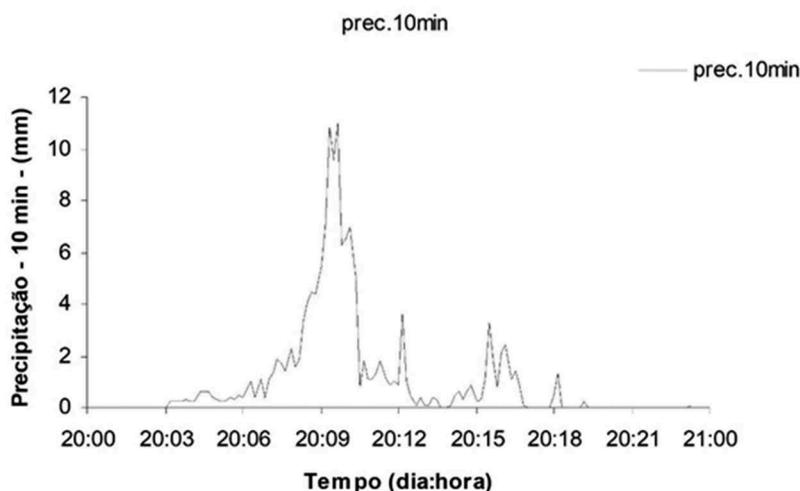


Figura 5. Hietograma da precipitação (chuvada Wischmeier), no dia 20 de Fevereiro.

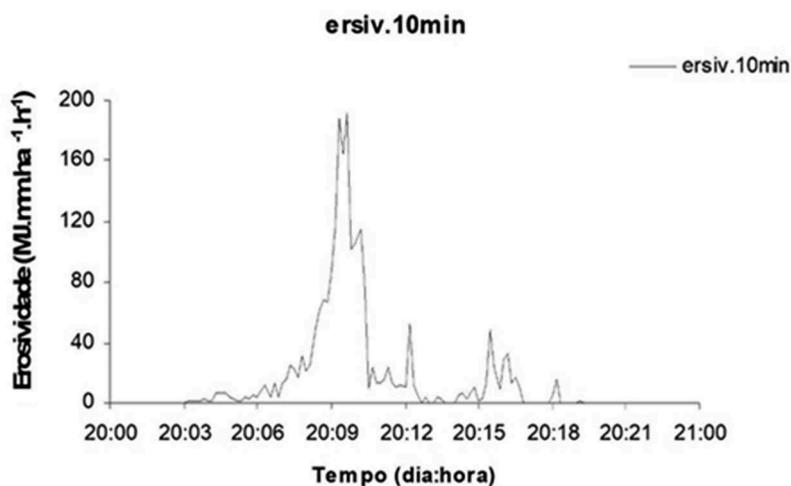


Figura 6. Histograma da erosividade da precipitação (Wischmeier), no dia 20 de Fevereiro.

Quadro 4. Precipitações máximas (mm), com durações de 1 a 4 dias e períodos de retorno de 20 a 1000 anos, para o posto Funchal-Observatório.

Período de retorno – T (anos)	Duração – t (dia)			
	1	2	3	4
1000	163.4	217.0	248.7	287.2
500	154.1	204.4	234.7	269.4
200	141.4	187.3	215.5	245.3
100	131.4	173.8	200.3	226.4
50	120.9	159.8	184.5	207.0
20	106.2	140.1	162.2	180.0

Quadro 5. Parâmetros a e b das curvas de possibilidade udométricas (PDF), $P = a \cdot t^b$, com t (dia), no posto Funchal-Observatório.

Período de retorno – T (anos)	$P = a \cdot t^b$	
	a	b
1000	163.4	0.399
500	154.2	0.396
200	141.6	0.392
100	131.7	0.389
50	121.3	0.386
20	106.7	0.381

147.0 mm a precipitação resulta, praticamente, da soma da precipitação dos dias 19 e 20 com o valor total de 151.2 mm, permitindo afirmar que a precipitação do acontecimento erosivo corresponde, na sua totalidade, a um período de retorno de cerca de 500 anos.

Na Figura 7 apresentam-se as curvas de possibilidade udométricas obtidas para o posto Funchal-Observatório, com períodos de retorno de 20 a 1000 anos e os valores máximos de precipitação para as durações de 30 minutos, 1, 6, 12, 24 h, 1, 2, 3 e 4 dias. Como se pode observar, os

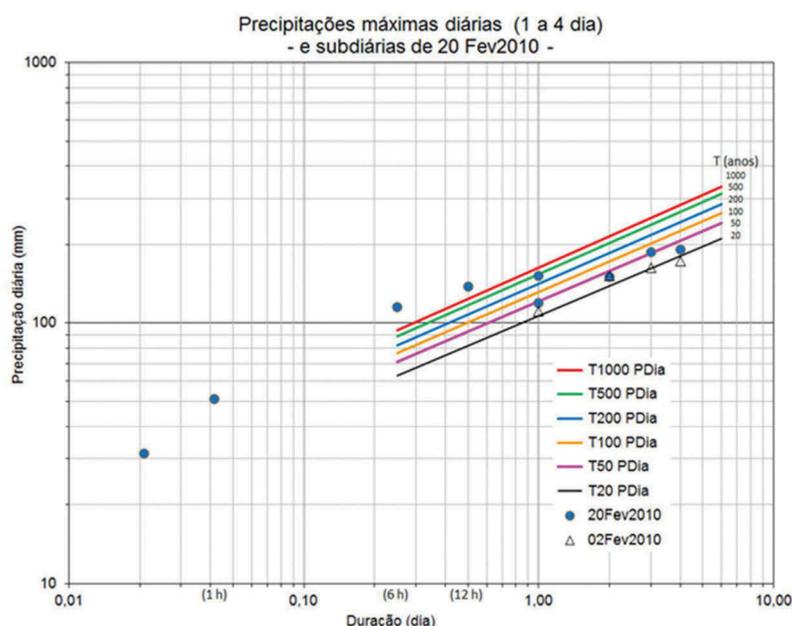


Figura 7. Curvas de possibilidade udométricas do posto Funchal-Observatório. Valores máximos de precipitação com durações de 30 minutos a 4 dias para o acontecimento de 20 Fev. 2010.

valores diários de durações de 1 a 4 dias apresentam períodos de retorno de cerca de 50 anos, mas, para os valores subdiários de pelo menos 100 anos e para as durações de 6 e 12 h os períodos de retorno situam-se, certamente, entre 200 e 500 anos [20] e os valores máximos relativos ao acontecimento de 20 de Fevereiro ocorreram entre as 8 e as 13 h.

5. Avaliação da perda de solo e da ameaça da erosão hídrica

5.1. Aplicação da Equação Universal da Perda de Solo (USLE/RUSLE)

Na aplicação da metodologia de Wischmeier seguiram-se os procedimentos prescritos no Agricultural Handbook, Nr. 537 [12] tendo sido, também, adaptados aspectos do Agricultural Handbook, Nr. 703 [4]. Como foi anteriormente referido, considerou-se uma abordagem particular para o cálculo da erosividade. Salientam-se alguns aspectos relevantes, nomeadamente no que respeita ao cálculo da erodibilidade do solo, do factor fisiográfico, do factor de coberto vegetal e do factor de prática agrícola.

O cálculo da erodibilidade do solo – K – é relativamente complexo e requer conhecimento das condições locais. Neste trabalho, as estimativas restringiram-se maioritariamente à aplicação da equação descrita anteriormente, sem ajustamentos, e à adopção de valores resultantes da experiência, no caso de não existirem

dados analíticos suficientes. A informação disponível foi a obtida na Carta de Solos da Ilha da Madeira [2].

No **Quadro 6** apresentam-se os dados analíticos do solo (M – [limo e areia muito fina (%)] \times [100 – argila (%)]; % de matéria orgânica (Mo); código de classe de estrutura do solo (α) e código de classe de permeabilidade do solo (β) e os valores de K estimados. O perfil identifica a amostra de onde foram extraídos os dados analíticos, conforme consta na Carta de Solos da Ilha da Madeira [2].

No cálculo do factor fisiográfico – LS – aplicaram-se as Equações 8 a 10. A análise do comprimento de encosta (λ_e) foi elaborada com base na determinação de áreas contributivas a cada pixel, da definição da rede de drenagem e da avaliação das densidades de drenagem, com recurso a ferramentas SIG, do *software* ArcMap. Desta análise, e devido ao excepcionalmente forte relevo da Ilha, verificou-se que os valores mais consistentes para λ_e são os baseados no cálculo da densidade de drenagem (Equação 12):

$$\lambda_e = \frac{1}{2 \times Dd} \quad (12)$$

onde,

Dd – Densidade de drenagem (m^{-1}).

Foram obtidos para as encostas, o comprimento médio $\lambda_e \approx 150$ m, o declive médio $s \approx 25\%$.

A densidade de drenagem ($m \cdot m^{-2}$) resulta do quociente entre o comprimento de todos os cursos de água, de uma determinada área, pelo valor da área respectiva. O parâmetro L foi estimado com recurso a ferramentas do *software* ArcMap (valores a variar entre 1.28 e 4.75).

Quadro 6. Dados analíticos do solo e valor de K adoptado ($t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot ano^{-1}$).

	Tipo de solo	Área (km ²)	Perfil	M	Mo	α	β	K
CMd	Dystric Cambisols	2.157	134/80	2241.77	4.9	2	2	0.00967
			177/80	1984.67	7.3	2	2	0.00418
Cme	Eutric Cambisols	3.594	411/81	3142.41	3.6	2	2	0.01925
			579/81	-	-	-	-	-
Cmu	Humic Cambisols	13.415	7/80	2476.59	4.7	2.5	3	0.01707
			9/80	515.17	3.6	2	3	0.00287
			60/80	1567.84	2	2	2	0.00885
CMx	Chromic Cambisols	38.414	16/80	2589.60	5.8	2	2.5	0.01170
			181/80	712.85	5.6	2.5	2.5	0.00366
			200/80	2165.80	2.9	2	2.5	0.01433
PHh	Haplic Phaeozems	51.724	66/80	1793.58	4.4	2	2.5	0.00911
			67/80	2498.88	2.9	2	2.5	0.01716
			160/80	1758.67	4.1	2.5	2.5	0.01140
			477/81	2067.59	4.7	2	2.5	0.01051
			142/80	2976.95	4.5	2	2.5	0.01728
			445/81	-	-	-	-	-
Vre	Eutric Vertisols	8.469	103/80	861.52	4.8	2.5	2.5	0.00491
			222/80	1918.69	3.1	2	2.5	0.01196
			234/80	1764.72	5.3	2	2.5	0.00767
			410/81	1214.07	5.1	2	2.5	0.00462
			993/82	900.29	2	2	3	0.00645
Anz	Vitric Andosols	9.071	5/80	1299.91	4.1	2.5	1	0.00331
			987/82	-	-	-	-	-
ANu	Umbric Andosols	298.557	22/80	2046.10	20.2	2	2.5	0.00145
			138/80	3842.15	9.3	2.5	2.5	0.01052
			163/80	2499.20	19.3	2	2.5	0.00243
			25/80	3592.35	16.5	2	3	0.00703
			63/80	1741.51	15.8	2	2.5	0.00153
			91/80	635.18	19.8	2	3	0.00083
			131/80	291.72	7.2	2.0	2.5	0.00080
			156/80	3204.81	7.2	2	2.5	0.01153
			170/80	816.79	35.8	2	3	0.00018
			221/80	4337.42	23.7	2	2.5	0.00428
			513/81	1863.00	17	2	2.5	0.00161
			6/80	536.43	36.5	2	3	0.00009
			148/80	1287.81	20.8	2	2.5	0.00012
-	Área Urbana	5.136	-	-	-	-	-	0.010
FLe	Eutric Fluvisols	4.716	26a/82	-	-	-	-	0.015
TAd	Terreno Acidentado Dístico	238.985	-	-	-	-	-	0.010
TAe	Terreno Acidentado Êutrico	42.752	-	-	-	-	-	0.010
TRd	Terreno Rochoso Dístico	18.002	-	-	-	-	-	0.005
Tre	Terreno Rochoso Êutrico	4.870	-	-	-	-	-	0.005

Na **Figura 8** apresenta-se a carta de distribuição adoptada para os comprimentos médios de encosta, na ilha da Madeira.

O factor de declive da encosta, S , foi calculado directamente através de ferramentas do mesmo *software*, com base no modelo digital do terreno (MDT). Na **Figura 9** apresenta-se a carta de declives obtida para a ilha da Madeira.

No cálculo do factor de coberto vegetal – C – utilizaram-se, os dados das classes de uso do solo da COSRAM (Carta de Ocupação do Solo da Região Autónoma da Madeira). No **Quadro 7** apresenta-se a descrição, código, área e valor atribuído a cada uma das classes dominantes.

Neste estudo para o factor de prática agrícola – P – aplicou-se o valor 1.0 a todo o território da ilha da Madeira, onde não foi identificado a existência de terraços/socalcos. No caso de terraços/socalcos foi atribuído o valor 0.1.

5.2. Ameaça da erosão do solo 'in situ'

Considerando como referência um estudo realizado para a ilha da Sicília [11] foi calculado o tempo, em número de anos e para toda a Ilha, em que deveria ocorrer a depleção total do recurso edáfico – solo de cobertura (de horizontes superficiais até 0.20 m) – considerando-se este valor como o indicador de ameaça da erosão. Foram adoptados os valores de possanças dos solos superficiais constantes nos dados analíticos da Carta de Solos da Ilha da Madeira.

Adoptaram-se as classes de ameaça: (a) **baixa** – mais de 500 anos para ocorrer erosão total; (b) **moderada** – o tempo varia entre 100 e 500 anos; (c) **alta** – resultando a erosão total entre 10 e 100 anos; (d) **muito alta** – quando, no máximo, em 10 anos se observa a erosão total do solo de cobertura.

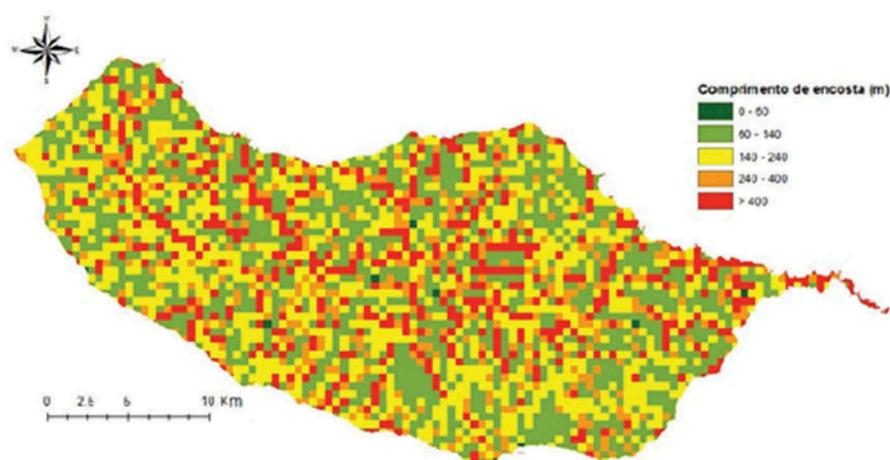


Figura 8. Carta de comprimentos médios de encosta, na ilha da Madeira (m).

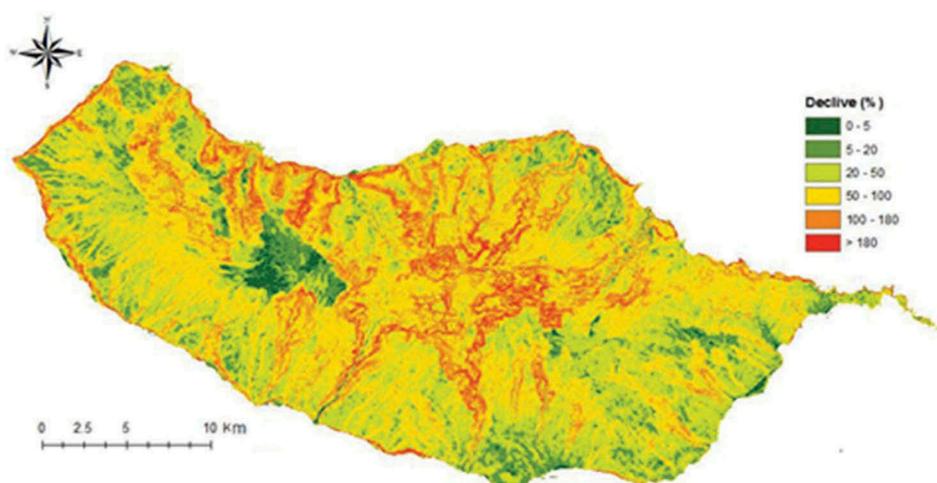


Figura 9. Carta de declives da ilha da Madeira (%).

Para contabilizar o peso volúmico aparente adoptou-se o valor de $1.7 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$. Com este valor, com a distribuição da erosão hídrica na ilha e o valor da possança do solo, calculou-se o tempo correspondente à perda total do solo de cobertura e definiram-se os níveis de ameaça.

6. Resultados

Da aplicação da metodologia descrita obtiveram-se as cartografias de cada factor da Equação Universal da Perda de Solo e, através destes, a carta de erosão hídrica para a ilha da Madeira (Figura 10). Posteriormente foram estimados os níveis de ameaça da erosão (Figura 11).

Para a erosividade de precipitação obtiveram-se valores compreendidos entre cerca de 661 e 8515 $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$. O valor médio de erosividade de precipitação da ilha é de, aproximadamente, 2960 $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$.

Quanto ao factor de erodibilidade do solo K , os valores obtidos variam entre 0.0001 e $0.0192 \text{ t}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\text{mm}^{-1}$, registando-se o valor médio de cerca de $0.008 \text{ t}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\text{mm}^{-1}$.

O factor de comprimento de encosta, L , apresenta valores que variam entre 1.28 e 4.75. Relativamente ao factor de declive, S , que resultou da aplicação dos valores de declive das encostas, representados na Figura 9, os valores calculados variam entre 0.03 e 16.12. O produto destes factores – factor fisiográfico (LS) – obtido para a ilha, apresenta o valor médio de 22.7 com o máximo da ordem de 76.4.

Relativamente ao factor de coberto vegetal os valores atribuídos variam, consoante as várias classes de uso e ocupação do solo, entre 0.001 e 0.35, apresentando o valor médio de cerca de 0.05. Como a área correspondente a terraços/socalcos é significativamente inferior à restante, o factor de prática agrícola P apresenta o valor médio de cerca de 0.98.

Quadro 7. Descrição, código, área e valor do factor de cultura (C) atribuído à classe.

Descrição	Código (COSRAM)	Área (km ²)	C
Tecido urbano contínuo pred. vertical	11111	3.32	0.00
Tecido urbano contínuo pred. horizontal	11121	18.37	0.00
Tecido urbano descontínuo	11211	12.14	0.02
Tecido urbano descontínuo esparso	11221	7.66	0.05
Indústria	12111	3.27	0.00
Equipamentos públicos e privados	12141	2.99	0.00
Rede viária e espaços associados	12211	4.08	0.00
Áreas em construção	13311	1.61	0.30
Campos de Golfe	14211	1.45	0.01
Culturas temporárias de regadio	21211	36.31	0.20
Vinhas	22111	11.46	0.10
Bananal	22218	8.03	0.03
Pastagens permanentes	23111	1.90	0.03
Sistemas culturais e parcelares complexos	24211	24.24	0.10
Agricultura com espaços naturais e seminaturais	24311	6.25	0.08
Florestas de castanheiro	31114	3.62	0.05
Florestas de eucalipto	31115	30.60	0.08
Florestas de espécies invasoras	31116	8.48	0.04
Florestas de outras folhosas	31117	5.25	0.05
Florestas de castanheiro com folhosas	31124	1.07	0.05
Florestas de eucalipto com folhosas	31125	15.74	0.06
Florestas de espécies invasoras com folhosas	31126	8.29	0.04
Florestas de outra folhosa com folhosas	31127	1.19	0.05
Floresta natural da Madeira	31128	161.25	0.02
Florestas de pinheiro bravo	31211	24.63	0.07
Florestas de outras resinosas	31213	4.87	0.07
Florestas de eucalipto com resinosas	31315	8.73	0.07
Florestas de espécies invasoras com resinosas	31316	4.63	0.05
Florestas de misturas de folhosas com resinosas	31318	1.07	0.06
Florestas de pinheiro bravo com folhosas	31321	44.14	0.06
Florestas de outras resinosas com folhosas	31323	1.97	0.06
Vegetação herbácea natural	32111	78.56	0.04
Matos densos	32211	103.99	0.03
Matos pouco densos	32221	57.96	0.07
Florestas abertas de pinheiro bravo	32431	4.45	0.12
Praias, dunas e areais costeiros	33121	1.77	0.00
Rocha nua	33211	5.59	0.00
Áreas ardidas	33411	2.23	0.35
Cursos de água naturais	51111	2.29	0.00

Pela aplicação da USLE observa-se o valor médio de cerca de $28 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ para a erosão hídrica. Os valores calculados variam, praticamente, desde zero até o máximo de cerca de $920 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, como se pode observar na [Figura 10](#).

Na [Figura 11](#) apresenta-se a carta da ameaça de erosão hídrica na ilha da Madeira, com os níveis de ameaça da erosão classificados em quatro classes.

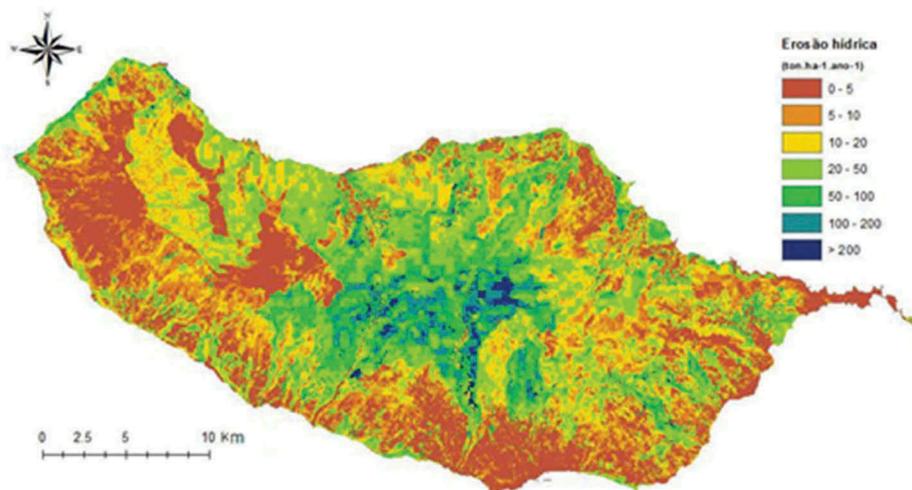
Com base nos resultados obtidos e analisados em 5.2 resultou que o tempo estimado para a total depleção do recurso edáfico é aproximadamente 20 000 anos; ainda, da análise da carta da ameaça de erosão hídrica ([Figura 11](#)), verifica-se ser significativa a área com níveis de ameaça muito alta e alta, que atingem cerca de 30% da superfície da Ilha. Pode-se inferir ainda, que estas zonas que têm associado um nível de ameaça de erosão alta (ou muito alta) correspondem a áreas com declives elevados.

7. Conclusões

Como foi referido, o valor médio estimado para a erosão hídrica na ilha da Madeira é de cerca de $28 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ com máximos, calculados, da ordem de $920 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ ([Figura 10](#)).

Os valores mais elevados verificam-se na zona central da ilha da Madeira e em áreas de declives mais acentuados, localizadas junto à costa e nos vales das ribeiras, embora estas áreas apresentem menor extensão. Observa-se, nas zonas mais urbanizadas, como é o caso do Funchal, e em outros núcleos populacionais, valores relativamente baixos de erosão hídrica.

No caso do acontecimento extremo de 20 de Fevereiro de 2010 verificou-se que a precipitação do acontecimento erosivo extremo (chuvada Wischmeier) teve um período de retorno global superior a 100 anos,

**Figura 10.** Carta da erosão hídrica (E) para a ilha da Madeira.

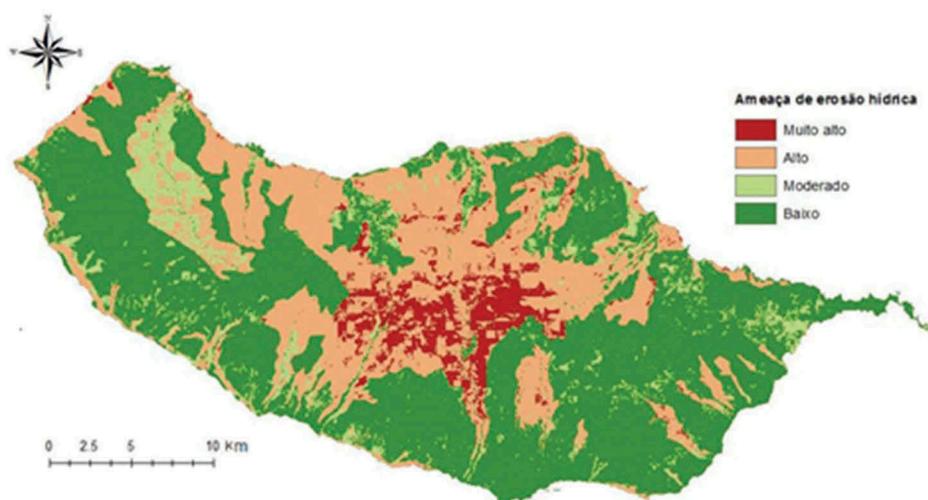


Figura 11. Carta da ameaça de erosão hídrica na ilha da Madeira.

com precipitações máximas subdiárias, designadamente de 6 e 12 h, situadas, pelo menos, entre 200 e 500 anos (Figura 7).

Relativamente à ameaça da erosão hídrica (Figura 11), apesar do valor médio do tempo estimado para a total depleção do recurso edáfico ser da ordem de 20 000 anos, reconhece-se ser muito significativa a área correspondente a níveis de ameaça muito alta e alta. As zonas com declives elevados têm associado níveis de ameaça de erosão alta (ou muito alta).

Os resultados obtidos são preliminares. A determinação de alguns factores será ainda aperfeiçoada e a análise mais aprofundada, estando ainda em curso estudos associados, designadamente, a acontecimentos extremos de erosão e a efeitos propagados aos cursos de água (*offsite effects*). Todavia, considera-se, que estas cartas de perda de solo e de ameaça de erosão hídrica permitem, desde já, a percepção da magnitude e distribuição do fenómeno erosivo na ilha da Madeira.

Notes on contributors

Miguel de Azevedo Coutinho, Civil Engineer, graduated at Instituto Superior Técnico (IST/Technical University of Lisbon, 1970) and PhD in Civil Engineer-River Mechanics (Colorado State University, Fort Collins, CO. USA, 1980). Professor of Hydraulics and Water Resources, chair of Fluvial Hydraulics, both at IST and Évora's University; retired now. He is currently a consultant engineering and scientific advisor at Portuguese and international level. Author of several publications and articles, his main fields are River Hydraulics, Hydrology, Soil and Water Conservation, Water Resources Management and Inland Navigation. He is member of several scientific and professional societies, namely, the Lisbon Geographic Society and

is a founder and council member of the European Society for Soil Conservation.

Rodrigo Proença de Oliveira is a Civil Engineer, from Instituto Superior Técnico University of Lisbon, with a MSc and PhD degrees in Water Resources Management and Planning from Cornell University, USA. Assistant Professor teaches hydrology, water resources and climate change at the University of Lisbon. He is a Researcher at CERIS, Instituto Superior Técnico, in the main fields of Climate Change Hydrology, Water Resources Engineering, Water Resources Management. Simulation and optimization of water resources system operation, Flood and drought risk evaluation, Impacts of climate change and adaptation strategies. He is active in private consulting in many countries.

Carla Rolo Antunes is graduated in Biophysical Engineer (University of Évora, 1993), MSc in Hydraulics and Water Resources (Technical University of Lisbon, 1995) and PhD in Hydrology (University of Algarve, 2010). She is an Assistant Professor at the Science and Technology Faculty in Algarve University (Portugal) and she is currently teaching Hydrology and Water Resources, Landscape Planning and Environmental Impact Assessment. Author of several publications, her main research fields are Hydrology and Watershed Modelling, Soil and Water Conservation, Environmental Impact Analysis and Assessment and Landscape Planning. From 2011 to 2015 she was Landscape Architecture Degree Director and since 2012 has been Director of the Master Degree programme in Rural Areas Sustainable Management, at the Algarve University.

Cláudia Tomás Caetano is an Environmental Engineer (integrated MSc degree in Environmental Engineer, 2014, Instituto Superior Técnico / University of Lisbon). She got a research assistance fellowship at CERIS (Instituto Superior Técnico / University of Lisbon). She presented a dissertation entitled Risk assessment of alluvium in the streams of Madeira Island. She is employed as an Environmental Engineer.

Agradecimentos

Este estudo foi fundamentalmente desenvolvido no âmbito do projeto EARAM2. Um agradecimento é devido ao Governo Regional da Madeira.

Declaração de informação

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Referências

- [1] Geoatributo. Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Arquipélago da Madeira (RH10). Direção Regional do Ordenamento do Território e Ambiente. Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais. Região Autónoma da Madeira; 2016.
- [2] DRA-RAM. Carta de Solos da Ilha da Madeira. Direcção Regional de Agricultura. Secretaria Regional de Economia. Funchal (Portugal): Região Autónoma da Madeira; 1992.
- [3] Coutinho MA, Oliveira RP, Caetano CT. Erosão Hídrica. Erosão específica. Ameaça de erosão “in situ”. Nota Técnica C1, C2, C3 e C4. Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira – 2ªFase (ERAM2). Funchal: G. Regional da Madeira; 2014.
- [4] Renard KG, Foster GR, Weesies GA, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation. W. Lafayette (IN): Estados Unidos da América (USA); 1997. (USDA. ARS. Ag. Handbook. Nr. 703, Roma, Itália).
- [5] Ballabio C, Borrelli P, Spinoni J, et al. Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. *SciTotal Environ.* 2017;579:1298–1315.
- [6] Bosco C, de Rigo D, Dewitte O, et al. Modelling soil erosion at European scale: towards harmonization and reproducibility. *Nat Hazards Earth Syst Sci.* 2015;15:225–245.
- [7] Meusbürger K, Steel A, Panagos P, et al. Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. *Hydrol Earth Syst Sci.* 2012;16:167–177.
- [8] Panagos P, Ballabio C, Borrelli P, et al. Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece. *Catena.* 2016;137:161–172.
- [9] Coutinho MA, Antunes CR, Tomás PP, et al. Caracterização da Erosividade da Precipitação no Sul de Portugal. *Revi Associação Portuguesa Recursos Hídricos.* 1994;15(3).
- [10] Coutinho MA, Antunes CR. Erosividade da precipitação para a ilha da Madeira. Análise da catástrofe de 20 de Fevereiro de 2010. *Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal. Rev Cienc Agrar.* 2013;36(4):417–425.
- [11] Fantappiè M, Priori S, Costantini E. Soil erosion risk. Sicilian Region (1:250.000 scale). *JMaps.* 2014;11(2):323–341.
- [12] Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Washington (DC); 1978. (USDA. SCS. Agricultural Handbook. Nr. 537).
- [13] Foster GR, McCool D, Renard KG, et al. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric u. *JS&WC.* 1981 Nov–Dec:355–359.
- [14] Antunes CR, Coutinho MA. A Conceptual Model of Rainfall Interception for Tree and Bush Canopies. 10th ISCO. Sustaining the Global Farm. Local Action for Land Stewardship; 1999; West Lafayette (IN). Purdue University.
- [15] Coutinho MA, Antunes CR. Leaf retention and throughfall drop sizes under *Quercus* sp. a contribution for a conceptual model of rainfall interception for tree and bush canopies, Cong. Mundial do Sobreiro e da Cortiça. C. Cultural de Belém; 2000; Lisboa.
- [16] Mannaerts CM, Gabriels D. Rainfall erosivity in Cape Verde. *Soil Tillage Res.* 2000;55(3–4):207–212.
- [17] Nazareno D. Estimating RUSLE’s rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean-an rainfall regime. *Hydrol Earth Sci.* 2004;8(1):103–107.
- [18] Silva AM. Rainfall erosivity map for Brazil. *Catena.* 2004;57:251–259.
- [19] Arnoldus HMJ. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco (Annex IV). In: *FAO soils bulletin 34 - assessing soil degradation.* Rome (Italy): FAO; 1997. p. 39–48.
- [20] Brandão C, Rodrigues R, da Costa JP. Análise de Fenómenos Extremos. Precipitações Intensas em Portugal Continental. Lisboa, Portugal: DSRH. SNIRH. INAG; 2001.
- [21] SRA e INAG. Plano Regional da Água da Madeira. Funchal (Portugal): Região Autónoma da Madeira; 2003.