

EROSÃO HÍDRICA DOS SOLOS – FATOR DE DESERTIFICAÇÃO FÍSICA E HUMANA

SOILS WATER EROSION – FACTOR OF PHYSIC AND HUMAN
DESERTIFICATION

EROSIÓN HÍDRICA DE LOS SUELOS – FACTOR DE
DESERTIFICACIÓN FÍSICA E HUMANA

António Canatário Duarte (acduartel@ipcb.pt)*

Victor Pissarra Cavaleiro (cavaleiro@ubi.pt)**

Ana Pereira Leite (anappleite@hotmail.com)***

RESUMO:

A erosão hídrica, com a conseqüente perda de solo, representa um custo para a agricultura já que significa perda de terra produtiva, nutrientes e matéria orgânica, bem como uma degradação ambiental dos recursos hídricos a jusante. Este ciclo de insustentabilidade levará, a prazo, a uma desertificação física dos lugares acompanhada de uma desertificação humana. É indispensável a compreensão do processo, a forma de influência de cada um dos fatores de que depende, para a adoção das medidas mais eficazes na sua prevenção. Este estudo decorre numa pequena bacia hidrográfica (190 ha), localizada no concelho de Idanha-a-Nova, onde foi instalado um dispositivo experimental adequado. A aleatoriedade do clima mediterrânico pode determinar anos com volumes de precipitação mais elevados a que correspondem maior número de eventos erosivos, e anos mais secos com a ocorrência de menor número de eventos erosivos, mas com potencial erosivo ampliado em alguns. Nesta análise de resultados concluímos sobre o enorme efeito protetor da vegetação ao compararmos a concentração de sedimentos no escoamento em dois eventos erosivos, correspondentes a condições de revestimento da bacia bastante diferentes. O escoamento superficial será mais ou menos potenciado, dependendo como se manifestam outros fatores que influenciam o processo erosivo, concretamente, a vegetação, o solo, a topografia do terreno, e as práticas culturais dos agricultores.

Palavras-chave: Erosão hídrica, solos, desertificação física, desertificação humana, clima mediterrânico.

ABSTRACT:

Water erosion, with the consequent soil loss, represents a cost to agriculture as it means loss of productive land, nutrients and organic matter as well as environmental degradation of water resources downstream. This cycle of unsustainability will lead, to a physical desertification of places accompanied by a

human desertification. It is essential to understanding the process, the influence of each factor that it depends, for the adoption of more effective actions for its prevention. This study takes place in a small watershed (190 ha), located in the Idanha-a-Nova county, where was installed a suitable experimental device. The randomness of the Mediterranean climate can determine years with higher volumes of precipitation that correspond to more erosive events, and driest years with the occurrence of fewer erosive events, but with expanded erosive potential in some of them. In this analysis we conclude about the strong protective effect of vegetation by comparing the sediment concentration in water in two erosion events, corresponding to quite different covering conditions in the basin. The runoff will be more or less powered, depending on how manifest other factors that influence the erosive process, namely, vegetation, soil, topography, and agricultural practices of farmers.

Keywords: Water erosion, soils, physic desertification, human desertification, mediterranean climate.

RESUMEN:

La erosión hídrica, con la consecuente pérdida de suelo, representa un costo para la agricultura ya que significa pérdida de tierra productiva, nutrientes y materia orgánica, así como una degradación ambiental de los recursos hídricos aguas abajo. Este ciclo de insostenibilidad llevará, a plazo, a una desertificación física de los lugares acompañada de una desertificación humana. Es indispensable la comprensión del proceso, la forma como de influencia de cada uno de los factores de que depende, para la adopción de las medidas más eficaces en su prevención. Este estudio transcurre en una pequeña cuenca (190 ha) en la comarca de Idanha-a-Nova, donde hay sido instalado un dispositivo experimental adecuado. La aleatoriedad del clima mediterráneo puede determinar años con volúmenes de precipitación más elevados a que corresponden mayor número de eventos erosivos, y años más secos con la ocurrencia de menor número de eventos erosivos, mas con potencial erosivo ampliado en algunos. En este análisis de resultados concluimos sobre el enorme efecto protector de la vegetación al comparar la concentración de sedimentos en la escorrentía en dos eventos erosivos, correspondientes a condiciones de revestimiento de la cuenca muy diferentes. La escorrentía será más o menos potenciada, dependiendo como se manifiestan otros factores que influyen el proceso erosivo, concretamente, la vegetación, el suelo, la topografía del terreno, y las prácticas de los agricultores.

Palabras Clave: Erosión hídrica, suelos, desertificación física, desertificación humana, clima mediterráneo.

* Professor Adjunto da Escola Superior Agrária/Instituto Politécnico de Castelo Branco, Doutor em Agronomia pela Universidade de Córdoba (Espanha), Investigador do CEER-Biosystems Engineering (Instituto Superior de Agronomia/UTL).

** Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura/Universidade da Beira Interior, Doutor em Engenharia Civil pela Universidade da Beira Interior, Investigador do Centro de Investigação GEOBIOTEC.

*** Técnica Superior da Direção Regional de Agricultura e Pescas do Centro, Mestre em Sistemas de Informação Geográfica pela Universidade da Beira Interior, Doutoranda em Engenharia Civil na Universidade da Beira Interior.

1. INTRODUÇÃO

O processo de erosão hídrica do solo sempre ocorreu na superfície da Terra, constituindo-se como uma das principais forças modeladoras da crosta terrestre. A erosão é assim um dos processos integrantes dos sistemas naturais, sendo, ao mesmo tempo, responsável pelo empobrecimento dos solos em algumas zonas, e pela ocorrência das melhores áreas de solos dedicados à actividade agrícola, de que são exemplo os depósitos aluvionares nas margens dos cursos de água. Falamos, neste caso, de *erosão geológica*, ou aquela que ocorre sem a intervenção humana no exercício de múltiplas actividades, e em que o sistema natural tem capacidade de reposição de equilíbrios sucessivos (García-Ruiz, 2010). A actividade humana, ancestralmente no exercício da actividade agrícola e atualmente no exercício de outras actividades, faz-se, normalmente, degradando os recursos que usa. A situação torna-se especialmente preocupante no caso dos recursos naturais não renováveis, ou renováveis a longo prazo, como é o caso dos solos. A intensificação da actividade agrícola e o surgimento de outras actividades degradativas, a não observância pelo uso adequado do solo, e ausência de práticas da sua conservação, conduz os sistemas a um equilíbrio instável, relacionado com o conceito de *erosão acelerada*. Torna-se imperioso não degradar mais do que a capacidade de renovação deste recurso natural (*tolerância anual de perda de solo*), ou, por outras palavras, usar de forma sustentável o solo. A erosão hídrica, com a consequente perda de solo, representa assim um custo para a agricultura, já que significa perda de terra produtiva,

nutrientes e matéria orgânica, iludida pelo aumento progressivo de fertilizantes que oneram o agricultor para manter uma determinada capacidade produtiva do solo (FAO, 1994). Ainda assim, esta trajetória será incapaz de assegurar a sustentabilidade do ecossistema agrícola e a manutenção da actividade de forma economicamente viável. Este ciclo de insustentabilidade levará, a prazo, a uma desertificação física dos lugares acompanhada de uma desertificação das comunidades rurais cuja vivência, e muitas vezes sobrevivência, assentam na actividade agrícola (Verón *et al.*, 2006).

Giraldez (1998) refere a importância apreciável da erosão hídrica nos países sujeitos ao clima do tipo mediterrânico, devido principalmente ao largo período estival, quente e seco, que dificulta a manutenção de uma cobertura vegetal permanente sobre o solo, e a ocorrência de chuvas no final do Verão e durante o Outono com grande potencial erosivo.

A contaminação provocada pelos sedimentos que são arrastados das parcelas agrícolas, tem uma dimensão física e uma dimensão química. A primeira diz respeito à perda de partículas do solo da sua camada superficial, e que dá lugar a níveis excessivos de turbidez nas águas recetoras e a repercussões ecológicas nos ecossistemas aquáticos (Casalí *et al.*, 2008). Por outro lado, o aumento da taxa de sedimentação nos cursos de água tem impacte negativo nas características hidráulicas dos cursos de água, reduzindo a sua profundidade e favorecendo a ocorrência de inundações. Outra consequência resultante de taxas de sedimentação elevadas é a colmatação das albufeiras, diminuindo, algumas vezes de forma drástica, a sua capacidade de armazenamento de água. Outra dimensão do problema é de natureza química, respeitante à fração mais fina dos sedimentos quimicamente ativa. Esta fração é responsável pelo transporte de substâncias químicas nocivas para o equilíbrio ecológico dos ecossistemas aquáticos, nomeadamente o fósforo, pesticidas e metais. Alguns estudos mostram que muito do azoto orgânico, e mais de 90% do fósforo, são transportados com as frações mais finas do solo (limo e argila), desde a origem até às massas de água recetoras (Troeh *et al.*, 1999). Por outro lado, no Plano Nacional da Água (Instituto da Água, 2010) é referido que o potencial predito obtido na regressão entre o fósforo total médio encontrado nas albufeiras (em mg/m^3) e a biomassa clorofilina (mg/m^3 de clorofila), confirma que o fósforo é o elemento determinante da eutrofização de albufeiras portuguesas, e que a regressão do estado trófico passará sobretudo e necessariamente pelo controlo das cargas afluentes, pontuais e difusas, deste elemento. A erosão hídrica, com a consequente perda de solo, representa também uma diminuição do potencial de sequestro de carbono, que é, como sabemos, um dos elementos mais

importantes na contribuição para o efeito de estufa da atmosfera terrestre (Lal, 2003).

Na sequência do nosso empenho em trabalho de investigação relacionado com a temática da erosão hídrica dos solos, este estudo propõe-se à concretização dos seguintes objetivos: caracterizar globalmente o processo de erosão hídrica dos solos integrando-o no processo de desertificação física e humana dos lugares, e fundamentar com resultados de investigação algumas particularidades da dinâmica de produção e arrastamento de sedimentos a várias escalas territoriais.

2. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A relação do processo erosivo com a distribuição do volume anual de precipitação, permite registar algumas conclusões de carácter genérico que ajudam a perceber a acuidade do problema nas regiões com clima mediterrânico. Em regiões de chuvas escassas (por exemplo até 400 mm de precipitação média anual) a erosão hídrica poderá ser compreensivelmente pequena, já que quando chove a água é retida pelo solo, que está normalmente seco, não originando escoamento (Morgan, 1997). Ainda que possam ocorrer algumas chuvadas intensas, o processo é grandemente limitado pelos pequenos volumes de precipitação. Nas regiões em que ocorre chuva abundante (por exemplo mais de 1000 mm de precipitação média anual), também não são de prever fenómenos erosivos intensos, dado que a chuva distribui-se ao longo do ano de forma a garantir uma proteção eficiente do solo pela vegetação; estas áreas seriam, no entanto, as mais expostas ao processo de erosão hídrica se fosse eliminada a vegetação, por exemplo na sequência de incêndios (Gimeno-García *et al.*, 2007). A erosão mais severa tenderá a ocorrer nas regiões em que a precipitação se situa entre os dois valores anteriormente referidos (Morgan, 1997). Nestas zonas, em que se incluem as regiões mediterrânicas, regista-se normalmente um período marcadamente seco e outro em que ocorre uma concentração das chuvas. Este período coincide muitas vezes com períodos de desproteção do solo (estados iniciais de desenvolvimento das plantas cultivadas), dando origem a fenómenos erosivos intensos (García-Ruiz, 2010). Devemos ter presente que nem todo o volume de precipitação contribui para o seu poder erosivo, mas só o que está relacionado com as denominadas *chuvadas erosivas* (Wischmeier e Smith, 1978). É claro que indiretamente todo o volume de precipitação contribui para o incremento do processo erosivo, por exemplo pela via de aumentar o teor de humidade do solo, e em chuvadas subsequentes ocorrer escoamento para intensidades de precipitação mais baixas, ou tendo influencia na estabilidade da agregação do solo (Cantón *et al.*, 2009). É

evidente que o processo erosivo é influenciado pela ponderação de outros fatores, como sejam a resistência do solo ao processo, a topografia e a cobertura do solo. Da integração da informação relativa ao *índice de erosividade da precipitação, erodibilidade dos solos*, cobertura vegetal e topografia, Pimenta *et al.* (1997) produziram uma carta de risco de perda de solo para o território continental português (Figura 1). Os mesmos autores, conjugando a informação cartográfica anterior com a informação relativa ao *Índice de seca* (calculado a partir do número de anos, em percentagem, em que o valor da precipitação anual é inferior a um limiar representado pelo quantil 0,01 da distribuição log-normal) e *Índice climático* (relação entre a precipitação anual média e a evapotranspiração potencial anual média calculada pelo método descrito em Penman, 1948), obtiveram uma carta de *Índice de desertificação* para o território nacional (Figura 1). Outros autores desenvolveram ferramentas similares, e indicadores, para calcular o risco de desertificação em regiões sob condições, nomeadamente, de clima mediterrânico (Santini *et al.*, 2010; Hellmén, 2008; Hill *et al.*, 2008; Gobin *et al.*, 2004).

Podemos constatar, pela análise da Figura 1, que uma grande parte do território nacional está sob a ameaça de perda elevada de solo por erosão hídrica, ocasionada por razões diversas nas diferentes zonas do país. Assim, na região a norte do país o factor que de forma decisiva condiciona o índice de perda de solo é a topografia, apesar da vegetação garantir uma boa cobertura do solo. Na região sul do território nacional, a fraca resistência dos solos ao processo de erosão hídrica, entre outras razões pelo baixo teor de matéria orgânica, e a escassa cobertura vegetal dos solos, são os fatores que mais podem influenciar a perda de solo. O cruzamento da informação relativa à suscetibilidade dos solos à erosão hídrica, com a informação do *Índice de seca* e *Índice de aridez*, permite obter uma nova carta de *Índice de desertificação* física do território nacional (Pimenta *et al.*, 1997). Podemos ver que grande parte das áreas com suscetibilidade elevada à erosão hídrica se sobrepõe às áreas com um risco elevado de desertificação, configurando aquele processo como um factor importante no processo de desertificação do país. A introdução nesta abordagem de indicadores sociais e económicos, tal como tem vindo a ser proposto por vários foros e autores ligados às questões da desertificação (Enne e Zucca, 2000), permite evidenciar também o risco de desertificação humana dos lugares.

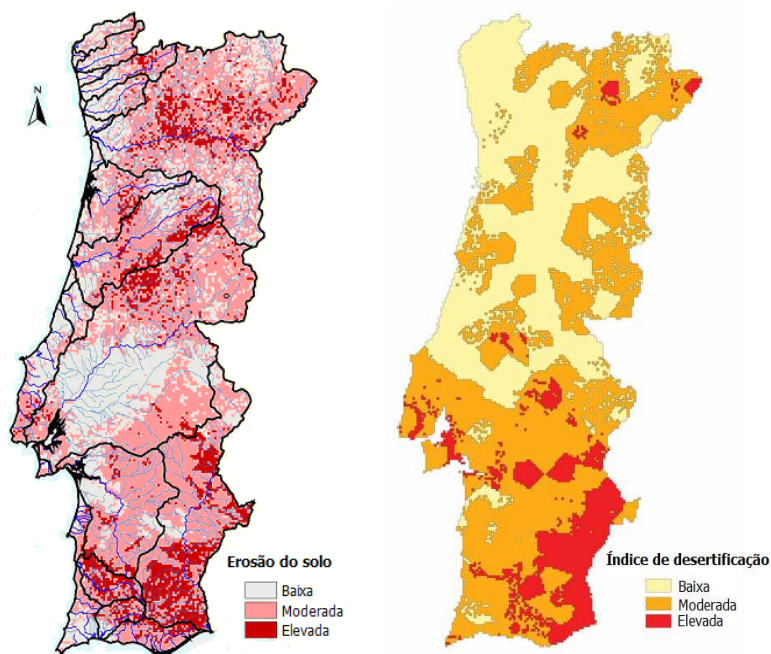


Figura 1: Índice de perda de solo para Portugal continental, integrando o índice de erosividade da chuva, erodibilidade dos solos, cobertura vegetal e topografia, e Índice de desertificação, integrando o Índice de seca e Índice climático (Pimenta *et al.*, 1997).

3. O PROCESSO DE EROSIÃO HÍDRICA E A DESERTIFICAÇÃO

Como já foi referido anteriormente, a erosão hídrica do solo é um processo geológico que sempre ocorreu na superfície terrestre, verificando-se ao cair chuva sobre uma superfície porosa não consolidada, apresentando, para a natureza e para actividade humana, aspetos positivos e negativos como qualquer processo geofísico. O processo contempla três fases com as suas especificidades e dinâmicas próprias (Cortez, 1987; Morgan, 1997). A primeira fase corresponde ao destacamento das partículas de solo, resultante do impacto das gotas de chuva na sua superfície. A energia de impacto depende da velocidade terminal das gotas de chuva, que por sua vez depende do seu tamanho, estando este relacionado com a intensidade da chuvada. Torna-se claro que quanto maior for o nível de agregação do solo, e quanto mais bem protegida estiver a sua superfície, menos eficaz é esta fase do processo erosivo. A segunda fase refere-se ao processo de transporte das partículas do solo pelo escoamento superficial gerado, podendo este ter poder suficiente para originar destacamento das partículas nas linhas de concentração do escoamento. A terceira fase diz respeito à sedimentação das partículas

arrastadas, ocorrendo sempre que o escoamento não tenha energia suficiente para transportar os sedimentos de diferentes dimensões. Como tal, a sedimentação pode verificar-se em qualquer ponto entre a origem dos sedimentos e a foz dos cursos de água, incluindo qualquer obstrução ao escoamento como por exemplo as barragens. A massa de sedimentos que sai de uma determinada unidade territorial, relativamente à massa de sedimentos produzidos, será sempre inferior à unidade, sendo o estudo desta taxa fundamental para se compreender os processos de erosão e sedimentação na sua distribuição espacial e temporal (Walling, 1983).

Importa definir, de acordo com as condições propícias e as consequências resultantes, as duas principais formas de erosão que ocorrem nas parcelas agrícolas, *erosão laminar* e *erosão concentrada*. A *erosão laminar*, tal como o nome sugere, afeta uniformemente toda a parcela, estando relacionada com o escoamento desorganizado na mesma, deixando eventualmente pequenos sulcos resultantes daquele escoamento que são desfeitos com as mobilizações de solo, ficando o efeito da erosão dissimulado. A *erosão concentrada* ocorre em consequência da concentração de caudais originados ao longo das encostas, deixando pequenas valas no terreno originadas por ravinamento (Giraldez, 1998), não sendo normalmente desfeitas com as mobilizações de solo. Nas parcelas agrícolas não são de prever formas mais graves de erosão do que aquelas que foram referidas. As formas de erosão concentrada podem ter uma dimensão mais preocupante, quando se conjugam todas ou algumas de outras condições como sejam, solos muito erosionáveis, declives e comprimentos de encosta elevados e proteção pouco eficiente do solo. Nesta circunstância estaremos perante um processo de ravinamento mais intenso, que origina ravinas e barrancos até dimensões consideráveis. A sua forma de evolução dependerá da consistência relativa dos diferentes estratos de solo e subsolo (Riou, 1992).

Os fatores que afetam o processo de erosão hídrica do solo são o clima, solo, topografia e vegetação. Destes fatores, a vegetação, as características do solo e a topografia do terreno, podem ser mais ou menos condicionados pela actividade humana; a vegetação é o factor que de forma mais fácil poderá ser condicionado. Neste contexto, a actividade humana, no desenvolvimento da atividade agrícola e de outras atividades, constitui-se também como um dos fatores que influenciam o processo.

Clima

Das variáveis climáticas aquela que assume importância mais relevante é, compreensivelmente, a precipitação através da sua intensidade, duração e frequência das chuvadas; ao poder da chuva em

originar fenómenos erosivos chama-se *erosividade da precipitação*. O embate das gotas de chuva no solo provoca a desagregação das partículas do solo (fase de destacamento), que será tanto maior quanto mais intensa for a precipitação. Se a gota cai sobre uma superfície horizontal, então a coroa circular é relativamente homogénea e o transporte de solo faz-se, mais ou menos, da mesma forma em todos os sentidos (Figura 2). Se, pelo contrário, a gota cai numa encosta, a coroa circular já não será homogénea, sendo maior a quantidade que salta no sentido da parte mais baixa da encosta; em consequência, o solo vai sendo transportado de *splash* em *splash* (Figura 3).

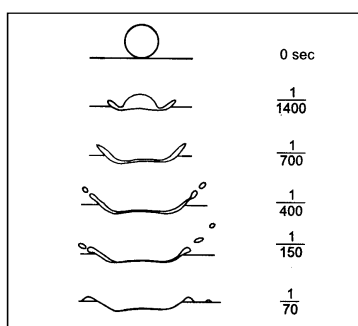


Figura 2: Efeito do impacto da gota de chuva na superfície do solo (superfície horizontal) (Hillel, 1998).

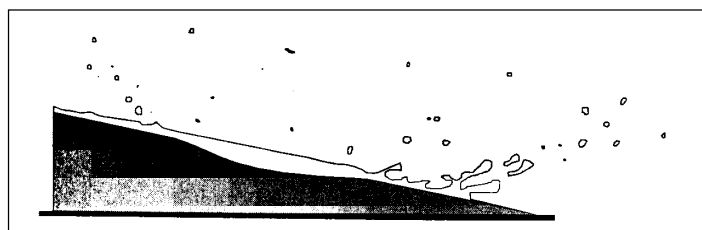


Figura 3: Efeito do impacto da gota de chuva na superfície do solo (superfície em declive) (Hillel, 1998).

Chuvadas de curta duração são normalmente mais intensas, pelo que, mesmo que o solo esteja relativamente seco, são capazes de gerar escoamento superficial. Chuvadas de duração mais prolongada são normalmente menos intensas. Porém, fazendo baixar a taxa de infiltração do solo, geram escoamento para intensidades mais baixas em eventos subsequentes; a condição suficiente para o escoamento superficial é que a intensidade da precipitação seja superior à taxa de infiltração do solo.

Duarte (2006), numa bacia hidrográfica experimental (189 ha) localizada no Aproveitamento Hidroagrícola da Campina da Idanha, com base em dados recolhidos num dispositivo experimental próprio (Figura

4), estabeleceu uma comparação entre a evolução das curvas acumuladas de escoamento e sedimentos (sólidos suspensos totais) verificadas num ano seco (2004/2005) e num ano de precipitação normal (2005/2006), ajudando a perceber a dinâmica do arrastamento de sedimentos de uma pequena bacia hidrográfica.



Figura 4: Aspeto do dispositivo experimental instalado na secção de referência da bacia hidrográfica de estudo, localizada no Aproveitamento Hidroagrícola da Campina da Idanha.

Num ano de precipitação normal, as curvas de escoamento e sedimentos acumuladas deveriam apresentar uma tendência similar, ainda que evoluindo por níveis (Kirkby, 1980), sobretudo a curva dos sedimentos. Este comportamento é o que é registado no gráfico abaixo respeitante ao ano de 2005/2006 (Figura 5). Pelo contrário, no gráfico da Figura 5 referente ao ano 2004/2005, a curva dos sedimentos evolui apenas em três níveis, relacionados com os eventos erosivos mais ou menos significativos (20 e 27 de Outubro e 1 de Dezembro). Nos períodos intermédios a curva do escoamento evolui de forma suave devido sobretudo ao escoamento de base, originando pequenas variações de nível na curva dos sedimentos que pode ser devido ao poder erosivo do escoamento na rede de drenagem natural (Merrit *et al.*, 2003). A curva dos sedimentos no ano 2005/2006 evolui em número mais elevado de níveis (seis, com dados disponíveis até 31 de Dezembro de 2005), mantendo sempre a mesma tendência da curva do escoamento, e com uma transição entre níveis mais ou menos abrupta, dependendo da intensidade do escoamento na fase de decrescimento e de esgotamento do hidrograma do evento (Lencastre e Franco, 1984). Refira-se ainda que, apesar de no ano hidrológico 2004/2005 ter havido um evento erosivo de grande magnitude

(27 de Outubro), no ano 2005/2006, com dados somente até final de Dezembro, se registou uma perda de solo superior ao ano anterior (11512 kg e 8296 kg, respetivamente).

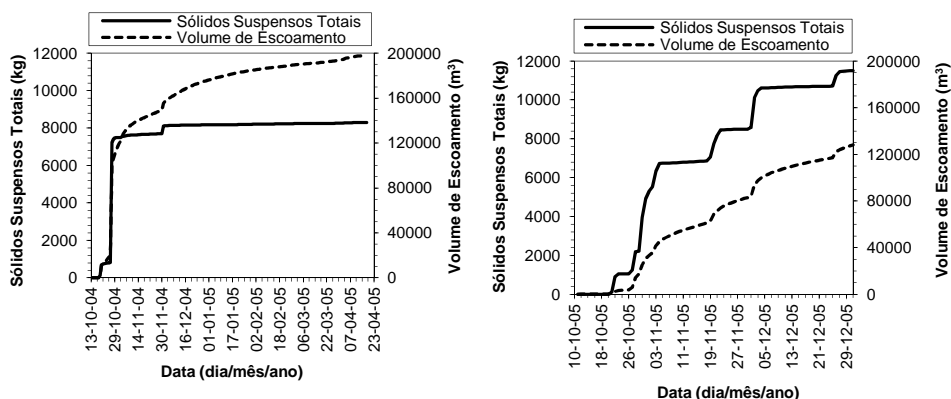


Figura 5: Evolução das curvas acumuladas de sedimentos e escoamento, numa bacia hidrográfica experimental, durante as estações de chuva de 2004/2005 e 2005/2006 (até 31/12/2005) (Duarte, 2006).

Solo

À resistência que o solo oferece ao processo de erosão hídrica, mercê das suas propriedades físicas e químicas, chama-se *erodibilidade do solo* (Bryan, 2000). Todas aquelas propriedades se conjugam para determinarem as duas propriedades básicas de que depende a erodibilidade do solo, permeabilidade e resistência à desagregação (Cortez, 1987; Cantón *et al.*, 2009). Como característica física não constante, o teor de humidade do solo no momento em que ocorre a chuvada também deve ser considerado. A matéria orgânica tem papel preponderante na agregação dos solos (nível e estabilidade da agregação); a matéria orgânica não decomposta funciona como cobertura protetora, tendo também alguma importância. Duarte (2006) concluiu como o teor de humidade do solo pode ser um factor determinante na produção de escoamento superficial. Os dados que a seguir se apresentam referem-se ao ano hidrológico de 2004/2005 que decorreu como um ano extremamente seco, pois para 610 mm de precipitação média anual para a zona do estudo (Idanha-a-Nova), apenas se verificaram 287 mm no ano em questão (Duarte, 2006). Durante o período de 18-21 de Outubro daquele ano hidrológico, com condições de solo seco, registaram-se 74.8 mm de precipitação, tendo saído da bacia hidrográfica 6.8 mm, a que corresponde um rendimento hídrico de 9.1%. No período de 25-28 do mesmo mês, com condições de solo muito húmido resultantes das chuvadas anteriores, ocorreram 55.1 mm de precipitação que deram origem a um volume drenado da bacia de 46.8 mm,

correspondendo um rendimento hídrico de 84.9%. Os valores anteriores também atestam a possibilidade de ocorrência de episódios de precipitação e de escoamento de grande intensidade em anos extremamente secos. O que foi referido anteriormente também pode ser constatado de uma forma diferente, através da análise da Figura 6, em que os eventos mencionados são localizados no início do ano hidrológico de 2004/2005.

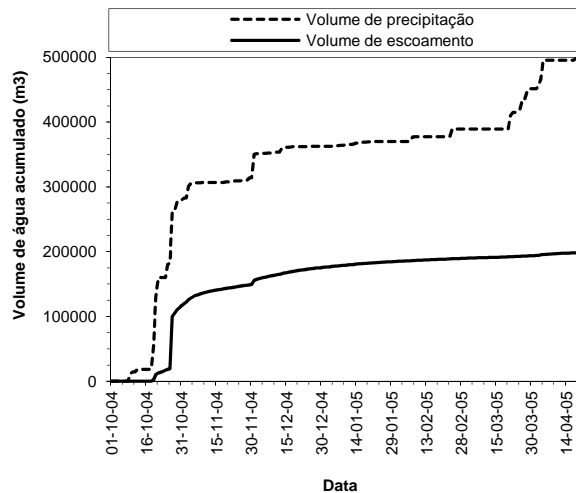


Figura 6: Evolução do volume de precipitação e de escoamento acumulados, ao longo do ano hidrológico 2004/2005 (Duarte, 2006).

Topografia

No factor topografia incluem-se, como preponderantes, o declive e o comprimento da encosta. O declive da encosta afeta principalmente a velocidade do escoamento, e o comprimento de encosta o volume de escoamento, ambos determinando a energia para provocar transporte e destacamento das partículas de solo. Encostas pouco declivosas estão normalmente relacionadas com elevados comprimentos de encosta, aumentando a sedimentação de partículas ao longo daquelas. Quando se trata o processo de erosão hídrica à escala de uma bacia hidrográfica, através do uso de modelos que simulam de forma distribuída, normalmente integrados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), é fundamental o uso de adequada informação topográfica contemplada num MDT (Modelo Digital do Terreno) com adequada resolução vertical e horizontal (Bingner e Theurer, 2001). Num estudo realizado numa bacia hidrográfica com uma área de 190 ha, Duarte *et al.* (2005) configuraram a sua topografia usando o módulo *FlowNet Generator* do modelo *AnnAGNPS* (*Annualized Agricultural Non Point*

Source) (Cronshey y Theurer, 1998), e concluíram que um MDT com resolução vertical de 5m não era suficientemente detalhado para contemplar a totalidade da rede de drenagem observada naquela unidade territorial, e por consequência o rigor da avaliação dos parâmetros topográficos que influenciam o processo de erosão hídrica.

Vegetação

A vegetação interfere no processo de erosão pelo efeito protetor do solo e pelo efeito retardador do escoamento superficial. O efeito de proteção traduz-se pela intercepção das gotas de chuva, evitando o impacto direto da chuva na superfície do solo (Mohammad e Adam, 2010; Leys *et al.*, 2010). O grau de proteção é variável para as diferentes culturas, e para os vários estados de desenvolvimento numa mesma cultura. O efeito retardador justifica-se pelo facto da vegetação constituir obstáculos ao escoamento, aumentando a rugosidade da superfície e retirando-lhe energia; este efeito é acrescido nas plantas que desenvolvem os caules e folhas junto ao solo. No mesmo estudo referido anteriormente, Duarte (2006) observou a acentuada influencia que pode ter a vegetação no processo, comparando o caudal e a concentração de sedimentos em dois eventos erosivos ocorridos com diferentes condições de revestimento do solo. O primeiro evento correu em meados de Outubro de 2005 (Figura 7; Evento 1), com condições de solo desprotegido em algumas parcelas da bacia hidrográfica junto da sua secção de referência, onde tinham sido semeados cereais de inverno (aveia). O segundo evento teve lugar a meio do mês de Janeiro de 2006 (Figura 7; Evento 2), com condições de proteção do solo bastante mais vantajosas nas mesmas parcelas, por a aveia estar num estado vegetativo mais avançado e por algumas infestantes se terem estabelecido no terreno. Em ambos os eventos erosivos, na fase ascendente dos respetivos hidrogramas, são obtidos bons coeficientes de correlação linear entre a concentração de sedimentos e o caudal, na secção de referência da bacia hidrográfica; este aspeto da dinâmica dos sedimentos foi observado por outros autores (Pathak *et al.*, 2004). Refira-se a título de exemplo, remetendo esta análise para a Figura 7, que no evento erosivo de Outubro (Evento 1) o caudal de 30 l s^{-1} transportou uma concentração de sedimentos de 1000 g l^{-1} , ao passo que no evento ocorrido em Janeiro (Evento 2) o mesmo caudal transportou uma concentração de sedimentos de um pouco mais de 100 g l^{-1} , ficando bem evidente a influência da proteção do solo na amplitude do processo erosivo.

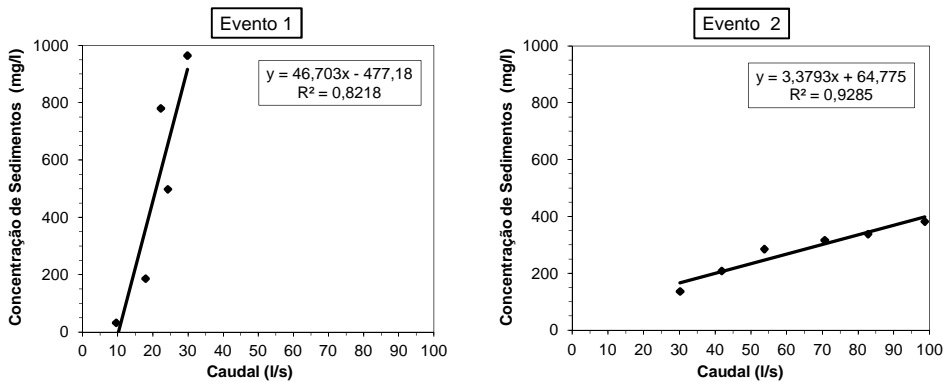


Figura 7: Relação entre o caudal e a concentração de sedimentos no escoamento na secção de referência de uma bacia hidrográfica experimental, em dois eventos de ponta na estação de chuva de 2005/2006 (evento de ponta 1 – 22/10/2005; evento de ponta 2 – 15/01/2006) (Duarte, 2006).

Actividade humana

A actividade humana faz-se sentir condicionando alguns dos fatores tratados anteriormente, umas vezes agindo com técnicas de conservação do solo, outras vezes, infelizmente a maior parte das vezes, com práticas degradativas do recurso solo. No âmbito da actividade agrícola a questão central é compatibilizar de forma equilibrada a função do solo como recurso natural e enquanto factor de produção (Bakker *et al.*, 2005). O aproveitamento do solo de forma continuada para além das suas capacidades, levará a prazo à degradação das suas propriedades e inevitavelmente à diminuição da sua resistência ao processo erosivo (Koulouri e Giourga, 2007). A perda física de quantidades mais ou menos elevadas de solo, ou simplesmente a perda qualitativa de alguns dos seus constituintes, para além da sua capacidade de regeneração natural, fará entrar este ecossistema numa espiral de degradação (Vanmaercke *et al.*, 2011). A sua interferência na componente terrestre do ciclo da água é evidente, principalmente por diminuir ou anular o efeito amortecedor do solo na geração de escoamento superficial. Em situações como estas torna-se inevitável o abandono da terra, por esta já não garantir condições mínimas para o desenvolvimento da actividade agropecuária (López-Bermúdez, 1990). Este panorama de desertificação física dos lugares dará lugar também a uma desertificação humana, cingindo-se a existência de populações numa determinada região a pequenos núcleos dedicados a outras actividades que não a actividade agropecuária. Esta é uma realidade existente em múltiplos sítios da península ibérica, incluindo alguns exemplos no território nacional, tendo por base, para além das contingências naturais, o uso inadequado do solo. É evidente que existem

outros fatores que condicionam o fenómeno de desertificação humana, para além da erosão hídrica do solo e dos fatores climáticos, como sejam: pastorícia excessiva, salinização dos solos em climas áridos, pressão demográfica em zonas de risco (Sequeira, 1999). A região mediterrânica, em que a generalidade do território nacional se inclui, está particularmente exposta ao processo de desertificação, física e biofísica, pela conjugação de vários dos seguintes fatores (Rosário, 2004): condições climáticas adversas, incluindo secas periódicas e grande variabilidade pluviométrica, elevadas perdas do coberto vegetal resultante da severidade dos incêndios florestais, crise da actividade agrícola ocasionando o abandono da terra, exploração não sustentável dos recursos hídricos originando poluição química, salinização e esgotamento dos aquíferos, ordenamento pouco harmonioso do território, correspondendo a uma concentração das atividades económicas, e das populações, na faixa litoral dos países. Foi com a consciência da importância do problema que Portugal subscreveu a Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação, tendo elaborado um Programa de Acção Nacional de Combate à Desertificação (PANCD) relativo à sua implementação regional no Mediterrâneo Norte, tendo tido uma vigência de catorze anos e encontrando-se em processo de revisão para mais um período de dez anos (CNCCD, 2011). Na primeira versão do PANCD, a conservação do solo e da água perfilava-se como um dos cinco objetivos estratégicos, e com certeza continuará a merecer a máxima atenção na sua versão revista. Outros programas de ação nacionais e regionais foram implementados com o mesmo objetivo (Rosário, 2004). De entre estes, destacamos: programa CORINE, que tenta modelar a incidência e a intensidade de processos de degradação específicos para avaliar o risco da erosão nos países mediterrânicos; programa MEDALUS, constituindo um sistema de indicadores da sensibilidade e vulnerabilidade da terra à desertificação e à seca, desenvolvidos principalmente dentro dos projetos de investigação; metodologia ESA (*European Space Agency*) para a definição de áreas ambientalmente sensíveis à desertificação, com desenvolvimentos de trabalhos em quatro "áreas alvo", Grécia, Itália, Espanha e Portugal. No nosso país a metodologia foi aplicada à zona de Mértola, constituindo um exemplo paradigmático do processo de desertificação biofísico.

4. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

Nas regiões com as características edafo-climáticas da generalidade do território nacional, é decisivo para o uso sustentável do solo o controlo da erosão hídrica, e mais ainda será num quadro de alterações climáticas, que, entre outros cenários, prevê o aumento de

fenómenos extremos (Veiga da Cunha *et al.*, 2006). Entre estes fenómenos aqueles autores destacam o aumento da frequência e intensidade de episódios de precipitação intensa, especialmente no Inverno, aumentando o risco de fenómenos intensos de erosão hídrica. É igualmente expectável o aumento da frequência e intensidade das vagas de calor estivais e o risco de secas associadas. Este cenário, conjugado com o aumento de erosão dos solos, representa um agravamento das condições favoráveis à desertificação física e humana de muitas zonas do território nacional.

A erosão, como processo natural, não é possível anular-se completamente, sendo prudente manter a perda de solo compatível com a sua capacidade de regeneração natural, e assim travar a espiral de degradação física do solo e de desertificação humana das zonas afetadas. Com as práticas de conservação consegue-se, ao mesmo tempo, diminuir as perdas de nutrientes das parcelas agrícolas, e por consequência a contaminação do meio hídrico a jusante, bem como reduzir as taxas de sedimentação nos rios e albufeiras. São várias as medidas de mitigação do processo de erosão hídrica dos solos, e de instrumentos que ajudem à definição de estratégias sustentáveis do seu uso, que iremos desenvolver a seguir. Das medidas mais eficazes no controlo do processo, destacamos as relacionadas com as práticas culturais dos agricultores. Estas medidas, visando a sua aplicação ao nível das parcelas agrícolas, têm como objetivo principal evitar que se inicie o processo, e devem ser conjugadas com outras estratégias de intervenção (Loureiro, 1994). Adotadas individualmente pelos agricultores, não requerem obras nem novos equipamentos, mas antes uma mudança de atitude.

Proteção do solo nos períodos em que a chuva é potencialmente mais erosiva

Atenuando a primeira fase do processo erosivo (destacamento das partículas) é uma medida eficaz no controlo da erosão hídrica, podendo ser assegurada por plantas vivas ou pelo restolho das culturas anteriores. Para este efeito ser efetivo as plantas devem estar estabelecidas antes do período de risco, que nas nossas condições climáticas médias se inicia em Outubro-Novembro e se prolonga até Março-Abril. Manter uma cultura de cobertura durante os meses de Inverno, em vez do solo inulto, reduz também o arrastamento do azoto, quer para o nível freático do solo, quer para as massas de água superficiais (Morgan, 1997; Nunes *et al.*, 2011).

Rotações menos intensivas, restolho das culturas e incorporação de resíduos

As alternativas de cultivo devem ser ponderadas de acordo com a capacidade de uso ou aptidão do solo, e adaptadas a uma determinada realidade climática. Deve estar presente a preocupação de manter um nível aceitável de fertilidade do solo. A prática de rotações menos intensivas deve contemplar a introdução de leguminosas, dado o seu papel na melhoria da estrutura do solo e das propriedades físicas que lhe estão associadas. Os resíduos das culturas deixados sobre o solo têm efeitos bastante benéficos no controlo da erosão hídrica. Asseguram, depois da colheita da cultura, uma cobertura mais ou menos eficaz do solo, e, depois de incorporados no solo e decompostos, garantem a manutenção ou o aumento dos níveis de matéria orgânica (Giménez e Govers, 2008). Os resíduos de compostagem, salvaguardando alguns efeitos prejudiciais através da vigilância sobre a evolução das propriedades do solo, podem representar um potencial importante de manutenção dos níveis de matéria orgânica, e na diminuição do processo de erosão hídrica (Carita, 2010).

Redução das mobilizações de solo

As mobilizações de solo devem ser reduzidas ao mínimo necessário, reunindo as vantagens de conservação do solo e diminuição dos custos de mecanização. As mobilizações de solo têm uma interferência negativa direta na destruição da estrutura do solo (que pode ser maior dependendo do estado de humidade do solo e da maquinaria agrícola usada), para além de se incrementar a oxidação dos compostos orgânicos, em solos que na generalidade são pobres naquele constituinte. Em conjunto com a redução das mobilizações, há que atuar no sentido da prevenção das causas da compactação dos solos agrícolas.

Culturas acompanhando as curvas de nível

As mobilizações de solo e as restantes operações culturais feitas contornando as curvas de nível, correspondem a uma armação do terreno com pequenas concavidades onde água fica armazenada e algumas partículas de solo ficam depositadas. É por isso evidente que esta forma de disposição das linhas das culturas, é um valioso contributo à criação de barreiras ao escoamento, e por consequência ao incremento da infiltração da água no solo (Figura 8).

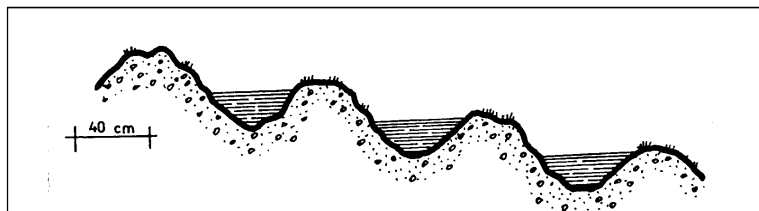


Figura 8: Corte transversal do terreno, com as linhas de cultura acompanhando as curvas de nível (Porta et al., 1999).

Em zonas mais declivosas, as medidas anteriores podem não ser suficientes para controlar o processo erosivo, e terem que ser tomadas outras que implicam alteração da topografia original do terreno. Estas medidas, adotadas ao nível das encostas dos terrenos agrícolas, evitam que o solo arrastado no escoamento superficial saia definitivamente das parcelas, ou que se gerem escoamentos superficiais elevados. As soluções preconizadas nesta categoria de medidas são as valas de drenagem superficial que interceptam o escoamento ao longo das encostas e o transportam para zonas protegidas, e os terraços nas suas múltiplas modalidades. A construção de terraços requer movimentações de terra, e portanto o uso de maquinaria pesada, e em algumas situações obras de construção civil. Refiram-se como exemplos os terraços construídos mais recentemente nas encostas da serra da Gardunha onde foram instalados sobretudo pomares de cerejeiras, e os terraços plantados de vinha nas encostas do rio Douro e seus afluentes, onde, mercê da tenacidade das suas gentes, conservaram o solo de encostas declivosas, garantindo o povoamento e vitalidade daquela região.

Devemos destacar também a existência de campos experimentais de estudo do processo erosivo, reproduzindo ou não condições padrão de estudos de referência nesta temática, que têm como objetivo compreender melhor o processo para melhor atuar no seu controlo (Boix-Fayos *et al.*, 2006). Entre os vários campos experimentais de erosão do solo no nosso país, aprez-nos referir os campos existentes na Quinta da Sra. de Mércules onde está instalada a Escola Superior Agrária de Castelo Branco (ESACB), e onde há muitos anos se recolhem dados experimentais (Figura 9).



Figura 9: Aspeto de um dos campos experimentais de erosão da ESACB.

Contribuindo de forma efetiva para a mitigação da erosão hídrica, os modelos de simulação, sendo uma simplificação da realidade, são instrumentos bastante úteis na definição de estratégias de conservação do solo (Jetten *et al.*, 1999). Os modelos podem simular para uma dimensão temporal (ano, dia, chuvada) e para uma dimensão territorial (parcela agrícola, encosta, bacia hidrográfica). Os modelos que processam dados de natureza vária e em quantidade mais ou menos elevada, permitem configurar situações alternativas ao uso do solo, acautelando a sua sustentabilidade (Morgan, 1997). Sendo modelos que tratam informação geograficamente distribuída em áreas mais ou menos grandes, nas suas versões mais atualizadas têm interface ou estão integrados em ambiente SIG. De entre a multiplicidade de modelos existentes, vocacionados exclusivamente para simular o processo de erosão ou mais abrangentemente para o processo de poluição difusa, referimos os seguintes: *AnnAGNPS* (*Annualized AGricultural Non Point Source*) (Cronshey e Theurer, 1998), *SWAT* (*Soil and Water Assesment Tool*) (Arnold *et al.*, 1996), *CREAMS* (*Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*) (Knisel, 1985); *WEPP* (*Water Erosion Prediction Project*) (Flanagan e Nearing, 1995); *EUROSEM* (*EUROpean Soil Erosion Model*) (Morgan *et al.*, 1998), *EPIC* (*Erosion Productivity Impact Calculator*) (Williams, 1985), *USLE* (*Universal Soil Loss Equation*) (Wischmeier e Smith, 1978), *RUSLE* (*Revised Universal Soil Loss Equation*) (Renard *et al.*, 1997), *KINEROS2* (*KINematic Runoff and EROsion Model*) (Smith *et al.*, 1995). Neste contexto, Duarte *et al.* (2007) aplicaram o modelo *AnnAGNPS* a uma pequena bacia hidrográfica

com uso agro-florestal, para perceber como se distribui o escoamento e a produção de sedimentos nas suas sub-bacias, considerando a informação geográfica associada (solos, topografia, uso do solo, práticas culturais). Da análise da distribuição do escoamento gerado na bacia hidrográfica de estudo (Figura 10) resulta evidente a existência de duas zonas distintas, uma com 58.6 ha, a sudeste da bacia, que tem associada uma produção baixa de escoamento ($0-40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), e a que corresponde uma área não cultivada, e outra com a restante área da bacia (130.4 ha), que tem associada uma produção de escoamento médio a elevado ($41-140 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), e a que correspondem áreas de várias culturas anuais. A área não cultivada, para além de ser menos declivosa do que a restante área, está ocupada com floresta jovem de azinheiras. Tendo a superfície do solo uma rugosidade elevada, é promovida a infiltração da água diminuindo o escoamento superficial gerado (Ayed e Adam, 2010). Na restante área a produção de mais ou menos volume de escoamento depende da topografia, da cobertura do solo e das características dos solos.

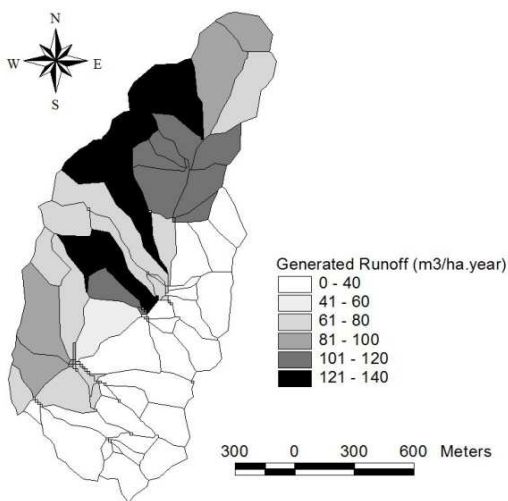


Figura 10: Distribuição espacial do volume de escoamento produzido, numa bacia hidrográfica experimental, operada pelo modelo de simulação *AnnAGNPS* (Duarte *et al.*, 2007).

Quanto à percentagem de produção de sedimentos por ano, relativamente à produção total na bacia, a expectativa imediata seria que houvesse uma correspondência entre as sub-bacias que produzem mais escoamento e as que têm associada uma maior taxa de produção de sedimentos; a comparação entre as Figuras 10 e 11 não nos permite concluir a suposição anterior. As sub-bacias que têm associada uma

produção de sedimentos mais elevada (Figura 11) são as que tiveram instalados cereais de inverno, que, como já referimos anteriormente, estão expostas durante alguns meses ao efeito agressivo da chuva. Torna-se assim evidente que o volume de escoamento gerado, embora importante, não é decisivo no processo de erosão hídrica, mas, conjugado com outros fatores desfavoráveis, como a cobertura deficiente do solo ou características intrínsecas desfavoráveis, potencia-lhe grandemente o seu efeito (Kirkby, 2002).

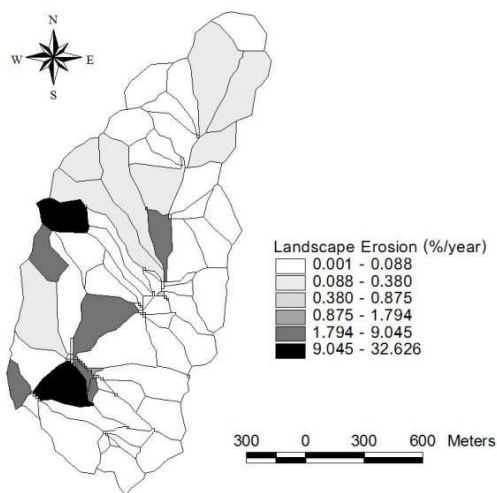


Figura 11: Distribuição espacial da percentagem de sedimentos arrastados por ano, numa bacia hidrográfica experimental, operada pelo modelo de simulação *AnnAGNPS* (Duarte *et al.*, 2007).

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Razões de ordem edafo-climática, conjugadas com políticas nem sempre consentâneas com a salvaguarda do uso sustentável dos recursos naturais (Oñate e Peco, 2005), determinam que grande parte do território nacional esteja sob o risco mais ou menos severo de erosão hídrica dos solos. Numa abordagem consequente desta questão devem ter lugar incentivos à implementação de medidas agroambientais que preservem os recursos, bem como políticas sensatas de ordenamento do território que invertam, ou que previnam, o processo de desertificação humana de algumas zonas do país. A conservação do solo e da água é apontada como uma das medidas estratégicas no Programa de Acção Nacional de Combate à Desertificação. De estudos levados a cabo numa bacia hidrográfica experimental, localizada no concelho de Idanha-a-Nova, têm sido apurados dados que permitem compreender a dinâmica do

escoamento e do arrastamento de sedimentos àquela escala territorial, e que ajudam na prevenção dos riscos de erosão hídrica dos solos. A aleatoriedade do clima mediterrânico, que se prevê acentuada num cenário de alterações climáticas, pode determinar anos com volumes de precipitação mais elevados a que correspondem maior número de eventos erosivos, e nos quais a curva acumulada da produção de sedimentos evoluirá com a mesma tendência da curva acumulada do escoamento. Contudo, apesar de nos anos mais secos ser previsível a ocorrência de menor número de eventos erosivos, alguns podem ter um potencial erosivo ampliado, como foi possível observar na bacia hidrográfica em consideração. A manutenção de uma cobertura vegetal no solo, sobretudo nos períodos de chuva mais críticos, é fundamental na prevenção do processo erosivo. Foi possível concluir nesta análise de dados sobre o enorme efeito protetor da vegetação ao compararmos a concentração de sedimentos no escoamento em dois eventos erosivos, correspondentes a condições de revestimento da bacia bastante diferentes. Pela natureza do processo, para ocorrer erosão hídrica é necessário que haja escoamento superficial; no entanto, a forma como se manifestam outros fatores, concretamente a vegetação, o solo, a topografia do terreno e as práticas culturais dos agricultores, determinará a forma como se manifesta o seu efeito no processo. Com a utilização do modelo *AnnAGNPS* é possível simular a distribuição espacial do escoamento e da taxa de produção de sedimentos, observando-se que não há uma correlação entre aqueles resultados exatamente porque a produção de escoamento superficial mais ou menos elevado, não é suficiente para provocar erosão hídrica de amplitude correspondente.

BIBLIOGRAFIA

- Arnold, J. *et al.* (1996); “*SWAT: Soil and Water Assessment Tool. User’s Manual*”. USDA, Agriculture Research Service Grassland, Soil and Water Research Laboratory, TX, p. 190.
- Ayed, G. e M. Adam (2010); “The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses”. *CATENA*, 81: 97-103.
- Bingner, R. e F. Theurer (2001); “Topographic Factors for RUSLE in the continuous-Simulation, Watershed Model for Predicting Agricultural, Non-Point Source Pollutants (AnnAGNPS)”. In: *Proceedings of the Soil Erosion Research for the 21st Century*, 3-5 January 2001, Honolulu, HI, USA.
- Bakker, M. *et al.* (2005); “Soil erosion as a driver of land-use change Agriculture”. *Ecosystems & Environment*, 105: 467-481.
- Boix-Fayos, C. *et al.* (2006); “Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation”. *Earth-Science Reviews*, 78: 267-285.
- Bryan, R. (2000); “Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope”. *Geomorphology*, 32: 385-415.
- Cantón, Y. *et al.* (2009); “Aggregate stability in range sandy loam soils. Relationships with runoff and erosion”. *CATENA*, 77: 192-199.

- Carita, F. (2010); “*Aplicação de composto orgânico produzido pela empresa VALNOR, para redução das perdas de solo por erosão hídrica nos solos do Norte Alentejano*”. Tese de Mestrado, Escola Superior Agrária/IPC, Castelo Branco.
- Casali, J. *et al.* (2008); “Runoff, erosion, and water quality of agricultural watersheds in central Navarre (Spain)”. *Agricultural Water Management*, 95: 1111-1128.
- CNCCD (2011); “*Avaliação Ambiental Estratégica da proposta de revisão do Programa de Acção Nacional de Combate à Desertificação 2011/2020, Relatório de Factores Críticos para a Decisão*”, Lisboa.
- Cortez, N. (1987); “*Erosão hídrica do solo: a Equação Universal de Perda de Solo e outros modelos de previsão*”, Instituto Superior de Agronomia, U. T. L., Lisboa.
- Cronshey, R. e F. Theurer (1998); “AnnAGNPS-Non Point Pollutant Loading Model”. In *Proceedings First Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference*, 19-23 April 1998, Las Vegas, NV.
- Duarte, A. *et al.* (2005); “Influência da resolução do Modelo Digital do Terreno, na configuração topográfica de uma bacia hidrográfica”. *Recursos Hídricos*, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Vol.27 N°1, 7-14.
- Duarte, A. (2006); “*Contaminación difusa originada por la actividad agrícola de riego, a la escala de la cuenca hidrográfica*”. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, Espanha.
- Duarte, A. *et al.* (2007); “Application of the AnnAGNPS model to a small agricultural watershed, to analyze the spatial and temporal distribution of the pollutants and runoff”. *Proceedings of the 5th International Congress of the European Society for Soil Conservation*, Palermo (Italy), 25-28 June.
- Enne, G. e C. Zucca (2000); *Desertification indicators for the European Mediterranean Region. State of the art and possible methodological approaches*. Ed. ANPA, Roma.
- FAO (1994); “Introduction à la gestion conservatoire de l’eau, de la biomasse et de la fertilité des sols”. R. Roose. *Bulletin Pédologique de la FAO No. 70*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Flanagan, D. e M. Nearing (1995); “*USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*”. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN, USA.
- García-Ruiz, J. (2010); “The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review”. *CATENA* 81: 1-11.
- Giménez, R. e G. Govers (2008); “Effects of freshly incorporated straw residue on rill erosion and hydraulics”. *CATENA*, 72: 214-223.
- Gimeno-García, E. *et al.* (2007); “Influence of vegetation recovery on water erosion at short and medium-term after experimental fires in a Mediterranean shrubland”. *CATENA*, 69: 150-160.
- Giráldez, J. (1998); “La erosión del suelo”. In: *Agricultura Sostenible*, Jiménez Días, R. M., J. Lamo de Espinosa, Ed., Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Gobin, A. *et al.* (2004); “Indicators for pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water”. *Environmental Science & Policy*, 7: 25-38.
- Hellén, U. (2008); “A coupled human–environment model for desertification simulation and impact studies”. *Global and Planetary Change*, 64: 158-168.
- Hillel, D. (1998); “*Environmental SoilPhysics*”. Academic Press, San Diego.
- Hill, J. *et al.* (2008); “Mediterranean desertification and land degradation: Mapping related land use change syndromes based on satellite observations”. *Global and Planetary Change*, 64: 146-157.
- Instituto da Água (2010); “*Plano Nacional da Água 2010*”. Instituto da Água, Lisboa.
- Jetten, V. *et al.* (1999); “Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models”. *CATENA*, 37: 521-541.
- Kirkby, M. (2002); “Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion”. *CATENA*, 46: 89-102.
- Kirkby, M. (1980); “Modelling water erosion processes”. In: *Soil Erosion*, Kirkby, M. J., R. P. C. Morgan, Eds., John Wiley, Chichester.

- Knisel, W. (1985); “*CREAMS—a Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*”. US Department of Agriculture Research Report No. 26, 643 pp.
- Koulouri, M. e C. Giourga (2007); “Land abandonment and slope gradient as key factors of soil erosion in Mediterranean terraced lands”. *CATENA*, 69: 274-281.
- Lal, R. (2003); “Soil erosion and the global carbon budget”. *Environment International*, 29: 437-450.
- Lencastre, A. e F. Franco (1984); “*Lições de Hidrologia*”. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.
- Leys, A. *et al.* (2010); “Scale effects on runoff and erosion losses from arable land under conservation and conventional tillage: The role of residue cover”. *Journal of Hydrology*, 390: 143-154.
- López-Bermúdez, F. (1990); “Soil erosion by water on the desertification of a semi-arid Mediterranean fluvial basin: the Segura basin”. *Ecosystems & Environment*, 33: 129-145.
- Loureiro, N. (1994); “*Medidas para a conservação e recuperação de solos no Algarve*”, Centro de Estudos para o Controlo da Erosão e Desertificação – Universidade do Algarve, Faro.
- Merritt, W. *et al.* (2003); “A review of erosion and sediment transport models”. *Environmental Modelling & Software*, 18, 761-799.
- Mohammad, A. e M. Adam (2010); “*The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses*”. *CATENA*, 81: 97-103.
- Morgan, R. *et al.* (1998); “The EUROSEM Model”. In: *Modelling Soil Erosion by Water* Boardman, J., Favis-Mortlock, D.T. Eds., NATO-ASI Series I-55, Springer, Berlin, pp. 389-398.
- Morgan, R. (1997); “*Erosión y Conservación del Suelo*”, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Nunes, A. *et al.* (2011); “Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal”. *Applied Geography*, 31 (2011) 687-699.
- Oñate, J. e B. Peco (2005); “Policy impact on desertification: stakeholders’ perceptions in southeast Spain”. *Land Use Policy*, 22: 103-114.
- Pathak, P. *et al.* (2004); “Sediment flow behaviour from small agricultural watershed”. *Agricultural Water Management* 67 (2004) 105-117.
- Penman, H. (1948); “*Natural evaporation from open water, bare soil and grass*”. Proc. Roy. Soc. London A (194), S. 120-145.
- Pimenta, M. *et al.* (1997); “*A proposal of indices to identify desertification prone areas*”. Jornadas de reflexión sobre el Anexo IV de aplicación para el Mediterráneo Norte – Convenio de Lucha Contra la Desertificación, Murcia.
- Porta, J. *et al.* (1999); “*Edafología – Para la agricultura y medio ambiente*”, 2ª Edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Renard, K. *et al.* (1997); “*Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*”. Agriculture Handbook N.703, U.S. Department of Agriculture Research Service, Washington, DC, USA. 348 pp.
- Riou, G. (1992); “*El agua y los suelos en los ecosistemas tropicales y mediterráneos*”. Masson, Barcelona.
- Rosário, L. (2004); *Indicadores de desertificação para Portugal continental*. Direção Geral dos Recursos Florestais, Editideias – Edição e Produção, Lda, Lisboa.
- Sequeira, E. (1999); “*Programa de Acção Nacional de Combate à Desertificação*”. CCD, Lisboa.
- Santini, M. *et al.* (2010); “A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index”. *Applied Geography*, 30: 394-415.
- Smith, R. *et al.* (1995); “KINEROS—A kinematic runoff and erosion model”. In: Singh, V. Ed., *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, pp. 697–732.

- Troeh, F. *et al.* (1999); “*Soil and Water Conservation – Productivity and Environment Protection, Third Edition*”. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Vanmaercke, M. *et al.* (2011); “Sediment yield as a desertification risk indicator”. *Science of The Total Environment*, 409: 1715-1725.
- Veiga da Cunha, L. *et al.* (2006); “*Recursos Hídricos, Alterações climáticas em Portugal - Cenários, impactos e medidas de adaptação – Projecto SIAM II*”. F. D. Santos e P. Miranda (Eds), Gradiva Publicações Lda., Lisboa.
- Verón, S. *et al.* (2006); “Assessing desertification”. *Journal of Arid Environments*, 66: 751-763.
- Walling, D. (1983); “The sediment delivery problem”. *Journal of Hydrology*, 65: 209-237.
- Williams, J. (1985); “The physical components of the EPIC model”. In: El-Swaify, S.A., Moldenhauer, W.C., Lo, A. Eds., *Soil Erosion and Conservation*. Soil Conservation Society of America, Ankeny, IA, pp. 272–284.
- Wischmeier, W. e D. Smith (1978); “*Predicting Rainfall Erosion Losses*”. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Handbook, 537, 58 pp.