

REVISTA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

VOLUME XXVII

NÚMERO 1

2004

SOCIEDADE PORTUGUESA DA CIÊNCIA DO SOLO

Encontro Anual da Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo

“Sistemas de Uso da Terra,
Ordenamento do Território e Ambiente

Ponte de Lima
5 a 7 de Setembro de 2002

EDIÇÃO ESPECIAL

Coordenada por
Manuel A. V. Madeira

SOCIEDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DE PORTUGAL

Instituição de Utilidade Pública

Fundada em 1903

Lisboa — Portugal

EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DOS ELEMENTOS GROSSEIROS NA EROÇÃO INTER-SULCOS: UM CONTRIBUTO PARA A SUA MODELAÇÃO

EFFECTS OF ROCK FRAGMENT CHARACTERISTICS IN INTER-RILL EROSION: A CONTRIBUTION TO MODELLING

T. de Figueiredo¹, A. G. Ferreira², D. Gonçalves³ & J. Poesen⁴

RESUMO

O papel da pedregosidade tem vindo a merecer, nos últimos anos, crescente interesse no quadro dos estudos sobre erosão dos solos. Se por um lado é reconhecida a influência das características dos elementos grosseiros na perda de solo, a incorporação desse efeito na modelação dos processos erosivos em solos pedregosos é ainda incipiente.

Com o objectivo de testar o efeito de várias características dos elementos grosseiros na erosão inter-sulcos, foi conduzido um ensaio experimental, à micro-escala. Os resultados do ensaio permitiram calibrar modelos explicativos da influência dessas características na perda de solo por salpico e por escoamento difuso.

Quarenta e oito tabuleiros metálicos de fundo perfurado ($612 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), contendo um solo franco-limoso, foram expostas a 240 mm de chuva natural, na Escola Superior Agrária de Bragança. Utilizaram-se elementos grosseiros simulados em 12 Tratamentos (quatro repetições cada), correspondentes a duas formas (rectangular e circular), três dimensões (cascalho, pedra miúda e pedra), três posições (pousados à super-

fície, semi e totalmente enterrados) e três percentagens de cobertura (17, 30 e 66%); testou-se também o Tratamento solo nu. Os tabuleiros, colocados em declive (10%), submeteram-se a uma "quase" saturação permanente. No fim de cada um dos cinco períodos de precipitação ocorridos durante o ensaio mediram-se infiltração, escoamento e perdas de solo no escoamento e por salpico. Os resultados aqui apresentados correspondem apenas aos registos globais de perda de solo.

Com base em considerações de ordem geométrica, foi desenvolvido um parâmetro único descritivo da pedregosidade – a distância entre elementos grosseiros – que contempla a sua forma e dimensão, para além da fracção de cobertura. Um modelo explicativo da perda de solo por salpico, incorporando este parâmetro e contando com o efeito da posição dos elementos grosseiros na intercepção das partículas projectadas, foi calibrado com sucesso, revelando boa concordância com os resultados globais do ensaio ($r^2=0,93$). Por sua vez, a distância entre elementos grosseiros mostrou-se não linear e significativamente correlacionada com os valores globais de perda de solo por escoamento ($r^2=0,97$).

ABSTRACT

The effects of rock fragments on soil loss and erosion processes are increasingly recognized as an important research topic. However, the influence of rock fragment characteristics in erosion processes is not yet fully accounted for in erosion modelling.

A micro-scale experiment was carried out under natural rainfall aiming at testing the effects of several rock fragment characteristics in interrill erosion. The results of this experiment were applied in the calibration of models designed to describe splash and wash losses in stony soils.

Forty-eight bottom-perforated boxes ($612 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), filled with a silt-loam soil, were exposed to 240 mm natural rainfalls, at Escola Superior Agrária de Bragança, Portugal. The 12 Treatments tested, 4 replicates each, consisted on selected combinations of 2 shapes (rectangular and circular), 3 sizes (small – 2 cm, medium – 4 cm and large – 10 cm), 3 positions (on top, half-embedded and totally embedded) and 3 cover percentages (17%, 30% and 66%) of simulated rock fragments and bare soil. The soil boxes were leaned at 10% slope and set to permanent "near saturation" conditions. Infiltration and runoff water and splash and wash sediment were measured at the end of each one of the rain periods that occurred during the experiment, by means of specially designed collection devices. The results presented here comprise only global records of soil loss (splash and wash).

A single parameter describing rock fragment characteristics was derived from geometrical considerations – distance between rock fragments. It formally depends on size and shape of rock fragments as well as on rock cover. The splash model developed incorporates that parameter and accounts for splash interception by rock fragments. The calibrated model showed a good agreement

with experimental results ($r^2=0,93$). Moreover, distance between rock fragments was non-linearly and significantly correlated with wash results ($r^2=0,97$).

INTRODUÇÃO

A maioria dos estudos sobre o efeito dos elementos grosseiros na perda de solo referem-se à sua característica mais directamente mensurável – a fracção de cobertura (entendida esta como a razão entre a área ocupada por elementos grosseiros e a área de terreno na qual se faz a avaliação, efectuada em ambos os casos em projecção ortogonal sobre a superfície, e designada por percentagem de cobertura quando multiplicada por 100). No entanto, como a diversidade natural dos materiais originários e dos produtos dos processos da meteorização são bem evidentes nos solos e nas paisagens, as características dos elementos grosseiros acusam muito ampla diversidade. Mesmo reconhecendo que o efeito dos elementos grosseiros na erosão e em processos físicos do solo se tornou tópicos de investigação relativamente comum (Poesen & Lavee, 1994; Gras, 1994), o facto é que pouco é conhecido sobre os efeitos integrados, na perda de solo, de características dos elementos grosseiros que não apenas a sua fracção de cobertura.

Poesen & Ingelmo-Sanchez (1992) e Poesen *et al.* (1990) estudaram o efeito da posição dos elementos grosseiros na erosão e escoamento superficial difuso em simulações laboratoriais. O efeito da dimensão foi também estudado em condições de simulação por Poesen & Lavee (1991) e Lavee & Poesen (1991).

Estudos incluindo o contributo de características dos elementos grosseiros centram-se mais em tópicos relacionados com os processos erosivos do que nos ditos processos em si. É o caso dos trabalhos de van

¹Escola Superior Agrária de Bragança, Apartado 172, 5301-855 Bragança, email: tomasfig@ipb.pt

²Departamento de Engenharia Rural, Universidade de Évora

³Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro e Instituto Politécnico de Bragança ⁴Laboratório de Geomorfologia Experimental, Universidade Católica de Lovaina, Bélgica

Wesemael *et al.* (1994) e van Wesemael *et al.* (1996) que incluíram a dimensão dos elementos grosseiros como efeito no estudo laboratorial da evolução da compactação e da rugosidade superficial de solos pedregosos ao longo de chuvadas erosivas. No mesmo sentido foram também os estudos de Valentin & Casenave (1992), que modelaram a infiltração em solos pedregosos incluindo o contributo da dimensão e da posição dos elementos grosseiros. Na sua revisão sobre a influência da pedregosidade na hidráulica do escoamento, Abrahams & Parsons (1994) referem-se aos efeitos da dimensão, forma, espaçamento e disposição espacial dos elementos grosseiros nas várias componentes da resistência ao escoamento.

Como se verifica pelas referências apresentadas, o processo de salpico não é contemplado nos estudos sobre este tópico, quer na componente destacamento quer na de transporte de partículas em solos pedregosos.

A influência das características dos elementos grosseiros na erosão inter-sulcos é, portanto, pouco conhecida e os modelos de erosão não incorporam mais do que a fracção de cobertura no seu formulário (Rose, 1985; Flanagan, 1994; Renard *et al.*, 1996; Morgan *et al.*, 1998).

Constitui objectivo deste trabalho apresentar um contributo para a modelação do efeito de características dos elementos grosseiros na erosão inter-sulcos, a qual comporta os processos de salpico e de transporte pelo escoamento superficial difuso. O objectivo foi cumprido em duas fases, cuja descrição compõe boa parte deste texto. Em primeiro lugar, verificaram-se experimentalmente e de modo detalhado aqueles efeitos, o que foi concretizado em ensaio conduzido à micro-escala, com elementos grosseiros superficiais simulados – condições tidas por adequadas à representação de áreas sujeitas a erosão inter-sulcos. Em segundo lugar, fo-

ram desenvolvidos procedimentos de estimativa de salpico e perda de solo no escoamento em superfícies pedregosas, calibrados quer com base nos resultados da experimentação efectuada quer em expressões reportadas na bibliografia.

MATERIAL E MÉTODOS

Sistema de experimentação

O delineamento experimental, por razões de exequibilidade, não foi factorial completo, antes incluindo combinações pré-seleccionadas dos seguintes efeitos e modalidades: (i) Percentagem de Cobertura (%RC), com solo nu, 17%, 30% e 66%; (ii) Dimensão dos elementos grosseiros, com pequenos (cascalho), médios (pedra miúda), grandes (pedra); (iii) Forma, com rectangular e circular; (iv) Posição, com pousados à superfície, semi-aflorentes e aflorentes (Quadro 1 e Figura 1). As combinações de efeitos testadas (Tratamentos) estão indicadas no Quadro 1, tendo-se instalado 4 Repetições por cada Tratamento.

Tabuleiros metálicos de fundo de rede, com 27,1 cm de comprimento, 22,6 cm de largura ($612 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ de área) e 5,5 cm de profundidade, constituíram o dispositivo experimental de avaliação dos efeitos mencionados. Aqueles foram preenchidos com uma camada de 2 cm de areia grossa, sobre a qual se colocou uma espessura de 3,5 cm de terra fina. No enchimento com terra fina asseguram-se densidades aparentes sucessivamente menores do fundo para a superfície (Figura 1). A terra fina utilizada proveio do solo dos Talhões de Erosão em vinha ao alto da Quinta de Santa Bárbara (Pinhão), sendo constituída por 5,2% de argila, 40,9% de limo, 49,8% de areia fina e 4,1% de areia grossa, com um teor de matéria orgânica de 0,5%.

No ensaio utilizaram-se elementos

QUADRO 1 – Delineamento Experimental: caracterização dos Tratamentos e dos elementos grosseiros

Tratamento	RC (%)	Dimensões		Forma	Posição
		Classe	Eixos (cm)		
1	0	-	-	-	-
2	16,9	Média	4,8 x 2,4 x 1,1	Rectangular	Superfície
3	30,1	Média	4,8 x 2,4 x 1,1	Rectangular	Superfície
4	65,9	Média	4,8 x 2,4 x 1,1	Rectangular	Superfície
5	30,4	Pequena	2,2 x 1,2 x 1,1	Rectangular	Superfície
6	30,1	Grande	9,6 x 4,8 x 1,1	Rectangular	Superfície
7	28,7	Pequena	Ø2,0 x 1,1	Circular	Superfície
8	28,7	Média	Ø4,0 x 1,2	Circular	Superfície
9	30,1	Média	4,8 x 2,4 x 1,1	Rectangular	Semi-Aflorante
10	30,1	Média	4,8 x 2,4 x 1,1	Rectangular	Aflorante
11	28,7	Média	Ø4,0 x 1,2	Circular	Aflorante
12 ^a	30,1	Média	4,8 x 2,4 x 1,1	Rectangular	Superfície

a – Tratamento não utilizado nesta análise, com areia grossa como material de teste

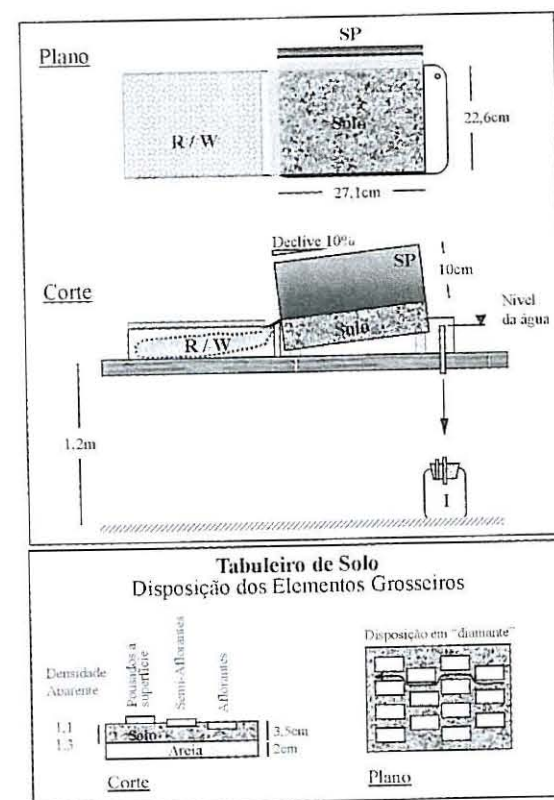


Figura 1 – Dispositivo experimental: coleta das perdas por Salpico (sedimento – SP), por Escoamento (água – R; sedimento – W) e por Infiltração (água – I)

grosseiros simulados. Para os retangulares, foi cortado ladrilho cerâmico nas dimensões pretendidas. Para os circulares, cortando tubos de PVC, obtiveram-se anéis com as dimensões pretendidas. Estes foram preenchidos com parafina fundente, na qual se mergulharam pequenas peças de chumbo de modo a atingir densidade comparável em todos os elementos grosseiros (cerca de 2,4). Nos Tratamentos com elementos grosseiros aflorantes e semi-aflorantes, estes foram colocados sem compressão do solo subjacente. Os elementos grosseiros distribuíram-se nos tabuleiros com disposição em “diamante” (Figura 1). Os tabuleiros foram saturados de água durante 24h, antes da sua exposição ao ar livre.

Os 48 tabuleiros dispuseram-se aleatoriamente em grupos de 6 sobre bancadas de madeira, a 1,2 m de altura. No fim de cada um dos cinco períodos de precipitação ocorridos durante o ensaio, mediram-se infiltração, escoamento e perdas de solo no escoamento e por salpico, com os dispositivos de colheita descritos em seguida (Figura 1). No lado direito de cada tabuleiro, encaixou-se o dispositivo de colheita do salpico, constituído por uma chapa metálica de 10 cm de altura por 27,1 cm de comprimento e por um colector cilíndrico fixado à base da chapa. O dispositivo podia ser desencaixado e repostado a qualquer tempo, o que aconteceu em cada uma das colheitas de salpico. Uma pequena ponte metálica amovível assegurou a ligação entre a parte frontal do tabuleiro e o dispositivo de recolha de água e sedimento escoados. Este compunha-se de um saco plástico, com a boca fixada por elásticos à ponte metálica, colocado no interior de um tabuleiro igual aos de solo (tabuleiro frontal), o qual foi coberto por uma placa de esferovite. Cada tabuleiro de solo encaixou-se no interior de um tabuleiro maior (base), em posição inclinada (10% de declive). Na zona posterior do tabuleiro de

base, através de um orifício aí aberto, fixou-se na vertical um tubo de plástico rígido com o topo ao mesmo nível que a base posterior do tabuleiro de solo. Este tubo funcionou com descarregador da água de infiltração dos tabuleiros de solo, evacuada através de um mangueira flexível para um frasco com cerca de 1L. Durante o ensaio, os tabuleiros de base foram preenchidos de água (1 ou 2 vezes por dia), até ao limite superior do tubo rígido referido. Isto não só assegurou que a água infiltrada, gerando um acréscimo no nível do tabuleiro de base, fosse descarregada pelo tubo rígido, como também garantiu condições de “quase-saturação” permanente dos tabuleiros de solo. O dispositivo experimental correspondeu a uma adaptação, com modificações consideráveis, do utilizado por Free (1952) e seguido também por Gonçalves (1964).

O ensaio experimental foi instalado na Escola Superior Agrária de Bragança, tendo os tabuleiros recebido um total de 240 mm de chuva natural.

Neste trabalho apenas se consideram os valores globais de Perda de Solo no Escoamento (W) e por Salpico (SP), expressos em termos relativos, a significar, para cada Tratamento e variável, a razão entre o valor medido no tratamento em causa e o medido em solo nu.

Em Figueiredo & Poesen (1998) e Figueiredo (2001) encontra-se informação adicional sobre o dispositivo experimental e os procedimentos de tratamento de dados.

Modelação

A distância entre elementos grosseiros

Com vista à modelação do efeito das características dos elementos grosseiros na erosão inter-sulcos, foram deduzidas as relações geométricas entre Fração de Cobertura (RC), Dimensão e Forma dos ele-

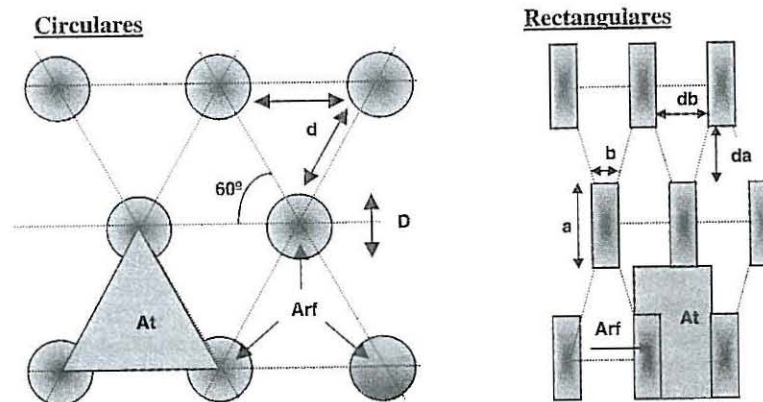


Figura 2 – Arranjo assumido para deduzir as relações geométricas entre Fração de Cobertura, Dimensão e Forma dos elementos grosseiros (At e Arf são as áreas total e coberta no domínio considerado; d é a distância média entre elementos grosseiros; nos retangulares, a e b são os seus eixos maior e intermédio, respectivamente, e da e db as distâncias entre elementos grosseiros segundo esses eixos; D é o diâmetro dos circulares)

mentos grosseiros. Para tanto assumiu-se o arranjo ilustrado na Figura 2. Este considera uma distribuição espacial dos elementos grosseiros como a adoptada no ensaio experimental (“em diamante” e com o eixo maior, a, paralelo ao declive e o menor, c, perpendicular ao plano da superfície).

A Fração de Cobertura (RC), para este arranjo, pode calcular-se por (ver significação dos símbolos na Figura 2):

$$RC = \frac{Arf}{At} = \frac{ab}{(a+da)(b+db)} \quad \text{Rectangulares} \dots(1a)$$

$$RC = \frac{Arf}{At} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D}{D+d} \right)^2 \quad \text{Circulares} \dots(1b)$$

Para os elementos grosseiros rectangulares, pressupôs-se que

$$\frac{a}{b} = \frac{a+da}{b+db} \quad (\text{equivalente a } \frac{a}{a+da} = \frac{b}{b+db}) \dots(2)$$

pelo que se obtém (equação 1a)

$$RC = \left(\frac{b}{db} \right)^2 = \left(\frac{a}{da} \right)^2 \dots(3)$$

Assim sendo, pode deduzir-se que

$$da = a \left(\frac{1}{\sqrt{RC}} - 1 \right) \dots(4a)$$

$$db = b \left(\frac{1}{\sqrt{RC}} - 1 \right) \dots(4b)$$

Uma estimativa da distância média (d) entre elementos grosseiros rectangulares pode obter-se por via de:

$$d = \sqrt{da^2 + db^2} \dots(5)$$

o que permite, com as equações 4a e 4b, chegar a:

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} \left(\frac{1}{\sqrt{RC}} - 1 \right) \dots(6)$$

Esta última expressão pode representar-se como abaixo (equação 7a) e comparar-se com a deduzida a partir da equação 1b para a forma circular (equação 7b). Evidencia-se, deste modo, a similaridade das expressões de d nas duas Formas consideradas:

$$d = a \left(\frac{1}{\sqrt{RC}} - 1 \right) \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a} \right)^2} \quad \text{Rectangulares} \dots(7a)$$

$$d = D \left(\frac{0,952}{\sqrt{RC}} - 1 \right) \quad \text{Circulares} \quad \dots\dots(7b)$$

De facto, nos rectangulares quando *b/a* tende para 1 (quadrados), o último factor tende para 2^{0,5}, o que corresponde à diagonal do quadrado de lado unitário; no caso dos circulares, tal medida confunde-se com o seu diâmetro, também unitário, pelo que o factor correspondente é de 1. Por outro lado, quando *d* tende para zero, *RC* tende para o seu máximo; ora, o numerador do factor em *RC* é o valor da raiz quadrada da Fracção de Cobertura quando a mesma é máxima – unitária para os rectangulares mas igual a 0,907 nos circulares (próximo de 91% de Percentagem de Cobertura). As expressões são ainda consistentes para o valor extremo de *RC* nula (e concomitantemente *D* ou *a* e *b* nulos), a qual implica *d* infinita.

Os pressupostos relativos a *da* e *db* nos rectangulares e a *d* nos circulares, aplicam-se à distribuição espacial dos elementos grosseiros “em diamante”. Neste arranjo, os centros de 3 elementos grosseiros vizinhos definem um triângulo, cujos ângulos não variam quaisquer que sejam as suas dimensões e a cobertura por eles proporcionada. Aceitou-se este pressuposto uma vez que, nos circulares, é o que permite a convergência para o arranjo mais compacto, quando aumenta *RC* e a dimensão dos elementos

grosseiros. A posição dos eixos dos elementos grosseiros relativamente ao solo, pressuposta nos rectangulares, corresponde, por outro lado, à situação mais estável que os mesmos podem assumir. Refira-se que pode não ser verificada nas condições de campo, tendo em conta as variadas pedoturbações enumeradas por Poesen & Lavee (1994).

A distância entre elementos grosseiros, tal como definida acima, reúne fracção de cobertura, dimensão e forma num só parâmetro. Para além disso, define as dimensões globais médias do espaço entre elementos grosseiros, que corresponde às zonas onde o escoamento se realiza e onde se geram e distribuem as partículas projectadas por salpico. Deste modo, entende-se este parâmetro como útil na descrição da perda de solo, quer por escoamento quer por salpico.

Efeito no salpico

A observação empírica sugere que o efeito das características dos elementos grosseiros no salpico resulta de duas componentes: (i) limitações à livre projecção de partículas destacadas, função da distância entre elementos grosseiros e da sua posição; (ii) retenção de partículas na área coberta, função da cobertura, dimensão e rugosidade dos elementos grosseiros (Figura 3). Este

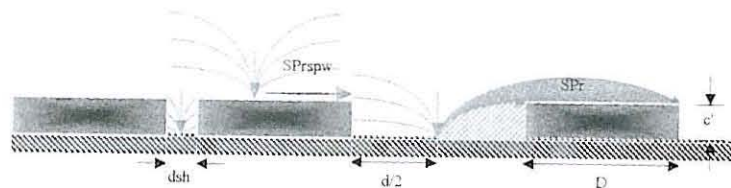


Figura 3 – Representação das componentes e variáveis envolvidas no modelo descritivo do efeito das características dos elementos grosseiros no salpico: SPrspw – partículas retiradas dos elementos grosseiros por salpico e escoamento; SPr – salpico para os elementos grosseiros; dsh – distância sombra entre elementos grosseiros corrigida; c’ – altura efectiva dos elementos grosseiros acima da superfície; d – distância média entre elementos grosseiros; D – diâmetro dos elementos grosseiros

enunciado pode traduzir-se formalmente em:

$$SP_{rel} = (1 - RC_{se}) (1 - SP_{rel}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

onde *SPrel* é a perda de solo relativa devida ao salpico, *RCse* a fracção de cobertura pedregosa efectiva para o salpico e *SPrel* é a retenção líquida de salpico pelos elementos grosseiros.

O primeiro factor do lado direito da equação 8 (em *RCse*) representa o efeito de intercepção do salpico pelos elementos grosseiros, o qual persiste para qualquer fracção de cobertura (*RC*). De facto, pode figurar-se uma área circundante de cada elemento, na qual existe destacamento mas o transporte por salpico é unilateral. A área coberta efectiva é, portanto, maior do que a proporcionada apenas pelos elementos grosseiros, já que a esta se acrescenta uma “área sombra”, dependente da altura dos elementos grosseiros acima do solo (da sua posição) ou, no limite, do diâmetro das gotas de chuva, e da distribuição dos ângulos de ejeção das partículas. Assim, a fracção de cobertura efectiva para o salpico (*RCse*) é dada por (ver também equação 1 e Figuras 2 e 3):

$$RC_{se} = \frac{Arf + Ash}{At} = RC + RC_{sh} \quad \dots\dots\dots(9)$$

onde *RCsh* representa a fracção de cobertura virtual devida a uma “área sombra” circundante de cada elemento grosseiro (*Ash*), onde o transporte por salpico é unilateral.

Por outro lado, o factor em *SPrel* na equação 8, corresponde ao balanço entre partículas adicionadas à superfície dos elementos grosseiros pelo salpico originado na área descoberta efectiva adjacente (*SPr*, salpico para os elementos grosseiros), e partículas daí retiradas por salpico ou escoamento (*SPrspw*; Figura 3). A primeira componente (*SPr*) depende da dimensão dos elementos grosseiros e da fracção de cobertura –já que

aqueles funcionam como sumidouros de partículas –, e da área descoberta efectiva – porque constitui a fonte de partículas. A segunda componente (*SPrspw*), depende da fracção de cobertura – afectando o salpico a partir dos elementos grosseiros –, da dimensão dos elementos grosseiros, especialmente o eixo maior, se paralelo ao declive – afectando o escoamento à superfície dos elementos grosseiros –, e da rugosidade da superfície dos elementos grosseiros – limitando ambos os processos. Assim:

$$SP_{rel} = SPr - SPrspw \quad \dots\dots\dots(10)$$

A equação 11 integra as equações 9 e 10 na 8, e representa o modelo aplicado para estimar o efeito das características dos elementos grosseiros na perda de solo por salpico:

$$SP_{rel} = (1 - RC - RC_{sh}) \left(1 - (SPr - SPrspw) \right) \quad \dots\dots(11)$$

Estimativa de parâmetros na calibração do modelo relativo ao salpico

Na equação 11, *RCsh*, *SPr* e *SPrspw* têm que ser estimados, com vista a calibrar o modelo. Tal foi realizado em parte com os resultados do ensaio experimental mais acima descrito, em parte recorrendo a modelos já estabelecidos.

No que diz respeito a *RCsh*, a regressão entre salpico relativo e percentagem de cobertura (linear, negativa e significativa), obtida a partir dos resultados do ensaio, mostra que, para elementos grosseiros rectangulares de dimensão média pousados à superfície, o salpico cessaria aos 88 %*RC* (Figueiredo & Poesen, 1998). De acordo com a equação 7a, a distância média entre elementos grosseiros nestas condições, daqui para a frente designada por distância sombra de base, *dsh**, seria de 0,29 cm. Este valor corresponde a diâmetros de gotas

de chuva observados por Tomás (1997), no Alentejo, para intensidade de precipitação de cerca de 80 mm h⁻¹ (o D50 global das gotas para intensidades de 0,1 a 120 mm h⁻¹ é de 0,12 cm). Isto significa que a distância sombra de base é muito menor do que a estimada considerando um ângulo médio de ejeção de partículas por salpico ($\theta=30^\circ$; Poesen & Torri, 1988), e muito mais próxima dos diâmetros das gotas de chuva. De facto, para $dsh^*=0,29$ cm e com a altura dos elementos grosseiros de 1,1 cm (no caso, igual ao eixo menor dos elementos grosseiros, c), obtém-se $\theta=75^\circ$, valor indicativo de grande dispersão na distribuição de ângulos de ejeção. O valor obtido de dsh deve ser corrigido para a altura efectiva dos elementos grosseiros (c'), igual a c para os pousados à superfície e menor para os semi-aflorentes:

$$d_{sh} = d_{sh}^* \frac{c'}{c} \quad \dots\dots\dots(12)$$

O valor de dsh (com $dsh^*=0,29$ cm) pode aplicar-se no cálculo de RCsh, admitindo que persiste para quaisquer fracção de cobertura e características de elementos grosseiros. As expressões deduzidas para este efeito apresentam-se abaixo e mostram a similaridade entre as duas formas consideradas (símbolos com o significado já descrito; Figuras 2 e 3):

$$RC_{sh} = \frac{RC}{ab} \frac{d_{sh}(a+b+d_{sh})}{ab} \quad \text{Rectangulares} \dots\dots\dots(13a)$$

$$RC_{sh} = \frac{RC}{D^2} \frac{d_{sh}(2D+d_{sh})}{D^2} \quad \text{Circulares} \dots\dots\dots(13b)$$

Na estimativa de SPr aplicou-se o estabelecido por Poesen & Torri (1988) para a correcção das medições de salpico, de acordo com a dimensão do dispositivo de captura ("splash cup"). Com efeito, SPr interpreta-se como a captura de salpico pelos elementos grosseiros, dependente da sua dimensão (sumidouro) e da da área circundante

(fonte). A relação entre salpico relativo e dimensão do dispositivo de captura, devida a Poesen & Torri (1988), é dada na equação 14, onde D é o diâmetro da "splash cup", em m, e SPr' é o valor de SPr não corrigido:

$$SPr' = e^{-5,4D} \quad \dots\dots\dots(14)$$

Por outro lado, Savat & Poesen (1981) estabeleceram que:

$$P = 1 - e^{-L/XT} \quad \dots\dots\dots(15)$$

sendo P a proporção de material projectado por salpico que atinge a distância L, a partir do ponto de impacto, e XT a distância real média ponderada de transporte de partículas por salpico (ambas em m). Como a equação 14 foi estabelecida para L tendendo para infinito, deve ser corrigida para L menor à custa da equação 15, calculando-se, por conseguinte, SPr por via de:

$$SPr = (e^{-0,5D/XT} - e^{-(0,5D+D)/XT}) e^{-5,4D} \quad \dots\dots\dots(16)$$

Nesta equação, a distância média entre elementos grosseiros (d, aqui expressa em m) é afectada pelo factor 0,5 no pressuposto de que a fonte se localiza a meia distância entre aqueles elementos (Figura 3). A diferença entre exponenciais representa a diferença entre as quantidades de material transportado por salpico até aos extremos distal e proximal dos elementos grosseiros. Tomou-se D igual à diagonal dos elementos grosseiros rectangulares, de modo a respeitar similaridade com os procedimentos de cálculo de d. XT é função da granulometria do material, obtendo-se, com a expressão de cálculo de Savat & Poesen (1981), um valor de 19,5 cm para a terra fina testada no ensaio (cujo D50 é de 24 μ m).

Finalmente, SPrspw estimou-se para o caso dos elementos grosseiros aflorantes, no

qual não ocorre intercepção do salpico ($c'/c = 0$). Neste caso, testado para 30 %RC por elementos grosseiros médios rectangulares e circulares, tem-se:

$$SP_{rel} = (1-RC)(1-SP_{ret}) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$SP_{ret} = 1 - \frac{SP_{rel}}{1-RC} \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$SP_{spw} = SPr - SP_{ret} = SPr + \frac{SP_{rel}}{1-RC} - 1 \quad \dots\dots(19)$$

A aplicação da equação 19 com valores de SPrel (resultados experimentais) e SPr (estimativas, equação 16) produziu valores de SPrspw praticamente nulos. Estes resultados sugerem uma rugosidade dos elementos grosseiros determinante de elevada proporção de material retido à sua superfície, o que foi visualmente verificado ao longo do ensaio, especialmente nos circulares. Por isso, a contribuição de SPrspw foi considerada nula nos cálculos subsequentes.

Efeito na perda de solo por escoamento

A observação empírica e a literatura indicam que o efeito das características dos elementos grosseiros na perda de solo no escoamento resulta essencialmente da introdução de elementos de rugosidade no percurso deste, traduzindo-se por perda de carga e, por consequência, perda de capacidade de transporte (Abrahams & Parsons, 1994). Poesen & Lavee (1991) e Lavee & Poesen (1991) notaram o contributo da distância entre elementos grosseiros para explicar a perda de solo devida ao escoamento superficial por eles observada em ensaios laboratoriais de simulação. De acordo com os referidos autores, esta distância expressa a continuidade do escoamento sobre a superfície descoberta e, assim, representa simplificada a rugosidade de forma que determina o retardamento do escoamento. Os elementos grosseiros imporiam,

portanto, restrições ao percurso do escoamento, função da distância entre elementos grosseiros. Tal como já atrás estabelecida, esta, por sua vez, incorpora fracção de cobertura, dimensão e forma dos elementos grosseiros na sua expressão de cálculo.

Deste modo, neste trabalho tratou-se, tão só, de identificar a relação funcional entre distância entre elementos grosseiros e perda de solo no escoamento. Os Tratamentos com elementos grosseiros aflorantes foram excluídos da análise, o mesmo não acontecendo com os semi-aflorantes, uma vez que os registos experimentais não apontam para a ocorrência de galgamento dos elementos grosseiros pelo escoamento (Figueiredo, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados experimentais

As perdas totais de solo no escoamento e por salpico foram em solo nu de 42,2 e de 70,6x10⁻³ kg m⁻², respectivamente. Os resultados do ensaio (valores relativos) apresentam-se no Quadro 2. Deles se extrai um marcado efeito da Percentagem de Cobertura (%RC), perfeitamente concordante com o reportado na bibliografia (Wischmeier & Smith, 1978; Poesen, 1992). Acresce que o efeito Dimensão foi o único a implicar diferenças significativas consistentes entre Tratamentos quanto à perda de solo, registando-se os menores valores relativos do ensaio nas menores dimensões de elementos grosseiros (se exceptuado o Tratamento com 66 %RC).

Aplicação dos modelos

A aplicação do modelo relativo ao salpico, calibrado do modo descrito mais acima, conduziu aos resultados que se apresentam na Figura 4. Nesta Figura opõem-se

valores observados e calculados de salpico, expressos em termos relativos, verificando-se estreita e significativa correlação entre ambas as séries ($r=0,966$). Os valores calculados sobrestimam ligeiramente o salpico medido, já que, em média, são 3% superiores aos observados (ver também ordenada na origem da equação de regressão da Figura 4). A mediana dos desvios entre estimativas e observações é de 2%. A sobrestimativa de 17% no Tratamento 7 (30 %RC, elementos grosseiros de dimensão pequena, circulares, pousados à superfície), reflecte a grande retenção de partículas à superfície destes elementos grosseiros, verificada visualmente ao longo do ensaio.

Deste modo entende-se que as equações estabelecidas representam bem o ensaio no que respeita ao salpico e à sua distribuição

pelas várias componentes identificadas.

A distância entre elementos grosseiros (d) é, por si só, um bom estimador da perda de solo por escoamento (Figura 5). Na verdade, d está positiva e não linearmente relacionado com aquela variável, mas os resultados para elementos grosseiros grandes não são consistentes com os restantes. Sendo este caso omitido, a qualidade do ajustamento na regressão entre perda de solo relativa e distância entre elementos grosseiros é muito considerável ($r=0,981$ com a função logarítmica).

Esta função estima $d=18$ cm para $W_{rel}=1$, significando que aquela distância se pode considerar fisicamente infinita à escala dos efeitos dos factores aqui abordados. Essa distância corresponde a cerca de 7%RC (calculada para elementos grosseiros

QUADRO 2 – Resultados globais do ensaio: médias expressas em valores relativos de Perda de Solo no escoamento (W_{rel}) e de Salpico (SP_{rel})

a) Efeito RC (elementos grosseiros médios, rectangulares, à superfície)				
Variável	Solo nu	Percentagem de Cobertura (%RC)		
		17%	30%	66%
W_{rel}	1,00	0,76	0,65	0,17
SP_{rel}	1,00	0,68	0,57	0,26

b) Efeito Dimensão (RC=30%, à superfície, duas formas)				
Variável	Forma	Dimensão		
		Pequenos	Médios	Grandes
W_{rel} *	Rectangular	0,37a	0,65c	0,50b
SP_{rel}	Rectangular	0,44a	0,57b	0,52b
W_{rel} *	Circular	0,33a	0,47b	—
SP_{rel}	Circular	0,40a	0,52b	—

c) Efeito Posição (RC=30%, duas formas)				
Variável	Forma	Posição		
		À superfície	Semi-aflorantes	Aflorantes
W_{rel}	Rectangular	0,65	0,58	0,60
SP_{rel}	Rectangular	0,57	0,48	0,58
W_{rel}	Circular	0,47	—	0,79
SP_{rel}	Circular	0,52	—	0,59

Nota: Efeito RC – apenas análise de regressão. Efeito Dimensão – valores seguidos da mesma letra na linha não diferem significativamente ($p>0,05$, teste dos contrastes independentes realizado após ANOVA); apenas em W_{rel} (*) o efeito Forma foi significativo. Efeito Posição – nenhum dos efeitos Posição e Forma foi significativo ($p>0,05$).

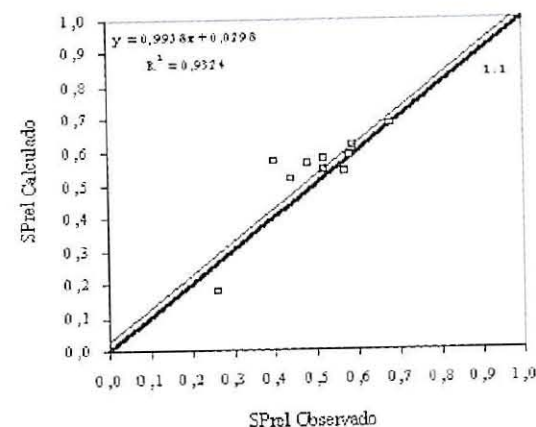


Figura 4 - Valores relativos globais de Salpico (SP_{rel}) observados e calculados de acordo com conjunto das equações 11, 12, 13 e 16, descritas no texto

médios, rectangulares), valor que se aproxima dos 10%RC, propostos em Poesen *et al.* (1994) como limiar acima do qual deixa de ser desprezável o efeito dos elementos grosseiros na erosão inter-sulcos. No outro extremo, a equação mostrada na Figura 5 estima $d=0,62$ cm para $W_{rel}=0$, significando que, para cerca de 80%RC (calculado para elementos grosseiros rectangulares de dimensão média), a perda de solo cessa. Deve recordar-se aqui que a cessação do salpico se estimou ocorrer aos 0,29 cm de distância entre elementos grosseiros, valor que é cerca de metade do referido para a cessação da perda de solo por escoamento superficial. Esta estimativa corrobora o que os resultados do ensaio experimental mostraram: um efeito das pedregosidades elevadas mais marcado na redução da perda de solo por escoamento do que por salpico (Quadro 2).

O aumento mais acentuado da perda de solo relativa verifica-se até $d=4,5$ cm, o que corresponde a cerca de 30 %RC (de novo calculado para elementos grosseiros rectangulares de dimensão média). Este valor de

fracção de cobertura pedregosa surge assim como um ponto de viragem assinalável no comportamento de solos com elementos grosseiros, sujeitos a erosão inter-sulcos.

CONCLUSÕES

Com base em considerações de ordem geométrica, deduziram-se neste trabalho expressões de cálculo da distância entre elementos grosseiros, que contemplam fracção de cobertura, dimensão e forma desses elementos. Deste modo, aquela distância incorpora num parâmetro único um conjunto importante de características dos elementos grosseiros. O valor prático deste parâmetro é tanto mais de assinalar quanto se revelou essencial para a explicação das perdas de solo por salpico e no escoamento, verificadas em ensaio experimental, também descrito neste trabalho.

De facto, mostrou-se aqui a importância da componente intercepção pelos elementos grosseiros na correcta estimativa do salpico em solos pedregosos, a qual depende não só da posição dos elementos grosseiros como

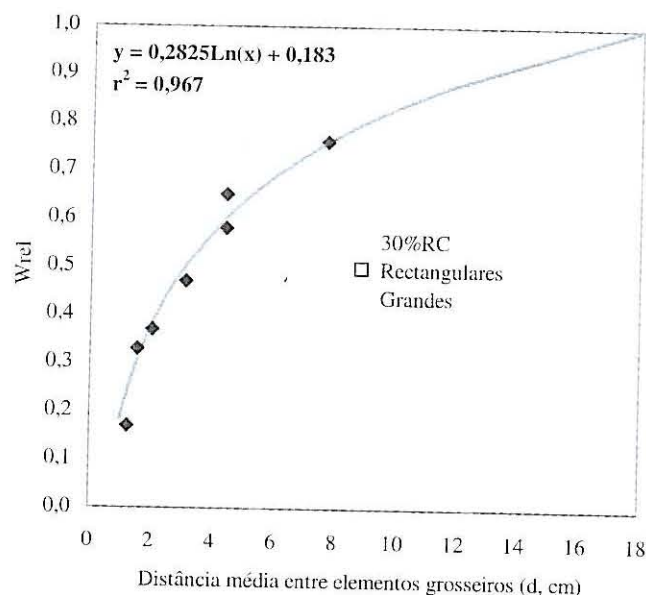


Figura 5 - Relação entre Distância média entre elementos grosseiros (d) e valores relativos globais de Perda de Solo no escoamento (Wrel). Nota: O tratamento correspondente ao símbolo aberto não se incluiu na série com a qual se obteve a equação regressão

também da distância entre eles. Estes parâmetros foram incluídos num modelo descritivo do salpico, calibrado com sucesso, que estima assim o efeito combinado de várias características dos elementos grosseiros na redução da perda de solo por salpico em solos pedregosos.

Por outro lado, a distância entre elementos grosseiros explicou, por si só, a perda de solo por escoamento difuso registada na maior parte dos Tratamentos testados no ensaio experimental. Mostrou-se, portanto, que este parâmetro é um bom descritor da pedregosidade superficial dos solos no que às perdas de solo no escoamento interessa, pois permite identificar o contributo de várias características dos elementos grosseiros na redução dessas perdas em solos pedregosos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahams, A. D. & Parsons, A. J. 1994. Hydraulics of interrill overland flow on stone-covered desert surfaces. In J. Poesen & H. Lavee (eds) *Rock Fragments in Soil: Surface Dynamics*, pp. 111-140. Catena 23 (special issue).
- Figueiredo, T. d'A. F. R. 2001. *Pedregosidade e Erosão dos Solos em Trás-os-Montes: Contributo para a Interpretação de Registos em Vinha ao Alto na Região do Douro*. Tese de Doutoramento. UTAD, Vila Real.
- Figueiredo, T. de & Poesen, J. 1998. Effects of surface rock fragment characteristics on interrill runoff and erosion of a silty loam soil. *Soil Till. Res.*, **46**: 81-95.
- Flanagan, D. C. 1994. *WEPP: Erosion Prediction Model, Version 94.7 User Summary*. NSERL Report N° 9, USDA-ARS, NSERL, West Lafayette, Indiana.
- Free, G. 1952. Soil Movement by Raindrops. *Agricultural Engineering*, **33**: 491-494, 496.
- Gonçalves, M. A. M. 1964. *Erodibilidade de Alguns Solos do Alentejo: Contribuições para o seu Estudo*. Relatório de Estágio. ISA, UTL, Lisboa.
- Gras, R. 1994. *Sols Caillouteux et Production Végétale*. INRA, Paris.
- Lavee, H. & Poesen, J. 1991. Overland flow generation and continuity on stone-covered soil surfaces. *Hydrological Processes*, **5**: 345-360.
- Morgan, R., Quinton, J., Smith, R., Govers, G., Poesen, J., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D. & Styczen, M. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**: 527-544.
- Poesen, J. 1992. Mechanisms of overland flow generation and sediment production on loamy and sandy soils with and without rock fragments. In A. J. Parsons & A. D. Abrahams (eds) *Overland flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*, pp. 275-306. Chapman and Hall, New York.
- Poesen, J. & Ingelmo-Sanchez, F. 1992. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position. *Catena*, **19**: 451-474.
- Poesen, J. & Lavee, H. 1991. Effects of size and incorporation of synthetic mulch on runoff and sediment yield from interrills in a laboratory study with simulated rainfall. *Soil Till. Res.*, **21**: 209-223.
- Poesen, J. & Lavee, H. 1994. Rock Fragments in Top Soils: significance and processes. In J. Poesen & H. Lavee (eds) *Rock Fragments in Soil: Surface Dynamics*, pp. 1-28. Catena 23 (special issue).
- Poesen, J. & Torri, D. 1988. The effect of cup size on splash detachment and transport measurements Part I: Field measurements. *Catena Supplement*, **12**: 113-126.
- Poesen, J., Ingelmo-Sanchez, F. & Mucher, H. 1990. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes and Landforms*, **15**: 653-671.
- Poesen, J., Torri, D. & Bunte, K. 1994. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. In J. Poesen & H. Lavee (eds) *Rock Fragments in Soil: Surface Dynamics*, pp. 141-166. Catena 23 (special issue).
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. & Yoder, D. C., coord. 1996. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA, Washington, D. C.
- Rose, C. 1985. Developments in soil erosion and deposition models. In B. A. Stewart (ed) *Advances in Soil Science, Vol. 2*, pp. 1-63. Springer-Verlag, New York.
- Savat, J. & Poesen, J. 1981. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash Part I: The calculation of absolute data on detachability and transportability. *Catena*, **8**: 1-17.
- Tomás, P. (1997) *Modelos de Previsão da Erosão Hídrica em Solos Agrícolas*. Tese de Doutoramento. IST, UTL, Lisboa.
- Valentin, C. & Casenave, A. 1992. Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56**: 1667-1673.
- van Wesemael, B., Poesen, J., & Figueiredo, T. de 1994. Effects of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall. *Soil Till. Res.*, **33**: 229-250.
- van Wesemael, B., Poesen, J., Figueiredo, T. de & Govers, G. 1996. Surface roughness evolution of soils containing rock fragments. *Earth Surface Processes and Landforms*, **21**: 399-411.
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses - a Guide to Conservation Planning*. USDA, Washington, D. C.