

REVISTA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

VOLUME XXIV

NÚMERO 3 E 4

JUL./DEZ. 2001

SOCIEDADE PORTUGUESA DA CIÊNCIA DO SOLO
UNIVERSIDADE DE ÉVORA
INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA

ENCONTRO ANUAL DA SPCS «USO DO SOLO E DA ÁGUA»

Universidade de Évora
15, 16 e 17 de Junho de 2000

EDIÇÃO ESPECIAL

SOCIEDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DE PORTUGAL

Fundada em 1903

Lisboa — Portugal

Valorização agronómica de resíduos de fibra de algodão da indústria têxtil por compostagem	158
<i>M. Costa, A. Fernandes & H. M. Ribeiro</i>	
Potencialidades de utilização do bagaço de azeitona como correctivo orgânico em solos da região mediterrânica	166
<i>J. M. Nunes, S. Pereira, A. Albardeiro, C. Silva, A. López-Piñeiro & C. Pintado</i>	
Utilização de casca de pinheiro envelhecida na cultura de plantas ornamentais envasadas	176
<i>H. M. Ribeiro, E. Vasconcelos, D. Ribeiro, F. Cabral & J. Q. dos Santos</i>	
Fertilização azotada da batateira: produtividade e aspectos qualitativos da cultivar Désirée	184
<i>M. A. Rodrigues, J. Coutinho, F. Martins e J. C. Soutinho</i>	
Efeito residual da aplicação de lamas de ETAR na disponibilidade do fósforo num Litossolo derivado de xistos e num Solo Litólico Não Húmico de granitos cultivados com pastagens ...	193
<i>M. G. Serrão, M. J. Neves & M. L. Fernandes</i>	
4 — BIOLOGIA E ECOLOGIA DO SOLO	
Avaliação da colonização ectomicorrízica em plantações experimentais de <i>Eucalyptus globulus</i> Labill	205
<i>E. Marchante, M. Madeira & H. Freitas</i>	
Influência de árvores isoladas de <i>Quercus rotundifolia</i> Lam. nas características do solo	213
<i>J. Nunes, C. Sá, T. Soares-David, M. Madeira & L. Gazarini</i>	
O uso de marcadores genéticos na caracterização de isolados do micobionte <i>Cenococcum geophilum</i> de solos ultramáficos do NE de Portugal	227
As térmitas como agente determinante de características de solos do sueste de Angola	239
<i>R. P. Ricardo, E. P. C. Franco & F. A. M. Conceição</i>	
Produção e decomposição da folhada de <i>Quercus suber</i> L.	245
<i>C. Sá, M. Madeira & L. Gazarini</i>	
Estudo das comunidades de artrópodes edáficos de um povoamento de <i>Eucalyptus globulus</i> (Labill.) submetido a diferentes opções de gestão de resíduos orgânicos	257
<i>C. Seabra-Ferreira, T. M. Vasconcelos & M. Madeira</i>	
5 — CONSERVAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE SOLOS E QUALIDADE AMBIENTAL	
Efeito da altura de água à superfície do solo na erosão intersulcos	273
<i>C. Alexandre & A. G. Ferreira</i>	
A erosão hídrica como factor limitante da aptidão da terra. Aplicação à região de Entre-Douro e Minho	288
<i>A. T. Constantino, & M. A. Coutinho</i>	
Metais pesados, arsénio e selénio em solos e vegetação da zona industrial de Estarreja	307
<i>M. Inácio, V. Pereira & M. S. Pinto</i>	
Erosão hídrica em Cambissolos da região da Beira Baixa. Algumas diferenças estatísticas entre anos secos e anos chuvosos relativamente aos factores C e K da USLE.	315
<i>P. M. S. Lopes, N. Cortez & J. N. P. Goulão</i>	
Qualidade da água de rega e riscos de salinização e de sodicização de solos do Alentejo	324
<i>J. C. Martins, M. C. Gonçalves, A. R. Gonçalves, F. P. Pires, A. V. Oliveira & C. P. Rodrigues</i>	
O factor de enriquecimento e a erosão hídrica selectiva	337
<i>J. R. Marques da Silva & A. G. Ferreira</i>	
Efeitos potenciais de arbustos do género <i>Cistus</i> L. na recuperação de solos	347
<i>M. P. Simões, M. Madeira & L. Gazarini</i>	
Efeitos da mobilização do solo sobre a erosão laminar. O destacamento de partículas de solo pelo impacto das gotas de água da chuva	361
<i>F. J. B. Teixeira, G. Basch & M. J. G. P. R. Carvalho</i>	

EFEITO DA ALTURA DE ÁGUA À SUPERFÍCIE DO SOLO NA EROSÃO INTERSULCOS

EFFECT OF SOIL SURFACE WATER DEPTH ON INTERRILL SOIL EROSION

POR

C. ALEXANDRE¹ & A. G. FERREIRA²

RESUMO

A erosão intersulcos tem significado principalmente quando se forma uma película de escoamento superficial, situação em que o impacto das gotas destaca partículas da superfície do solo e, simultaneamente, aumenta a capacidade de transporte do escoamento. Para estas condições é importante conhecer como varia a taxa de destacamento e a susceptibilidade dos solos ao destacamento pela chuva com a altura da película de escoamento. Neste artigo faz-se uma revisão da influência da altura do escoamento sobre o destacamento pela chuva e apresentam-se resultados de ensaios sobre o mesmo tema usando uma técnica simples de controlo da altura de água por imersão de caixas de destacamento («splash-cups») que permite a recolha do transporte aéreo e do transporte submerso de sedimentos pelo impacto de gotas. Realizaram-se ensaios de simulação de chuva de 30 minutos, com gotas de 3,2 mm de diâmetro, aplicando intensidades de

20, 40 e 80 mm/h, com 35%, 50% e 65% da energia cinética das gotas com velocidade terminal e alturas de água à superfície do solo (h) de 0, 1, 2, 3, 5 e 10 mm, recorrendo a amostras de uma areia comercial e do horizonte Ap de três solos das famílias A, Pg e Vx, da classificação portuguesa (Classificação da FAO/Unesco, respectivamente: Fluvissole Eutrício, Cambissolo Eutrício e Luvissole Crómico) em caixas de destacamento de 9,2 cm de diâmetro interno. O salpico decresce bruscamente com a altura da camada de água sobre o solo, sendo negligenciável para $h > 2$ mm. A perda de solo atinge um máximo para $h = 2-3$ mm, ou $2/3$ a $3/3$ do diâmetro das gotas. Para alturas superiores, decresce de forma quase linear no caso da areia e dos solos A e Pg, e segundo uma exponencial negativa no caso do Vx. Para alturas de água inferiores, o salpico aumenta e o transporte na lâmina de água decai rapidamente para zero. Basta uma ligeira película de água ($h < 1$ mm) para alterar substancialmente os mecanismos de transporte do-

¹ Dep. de Geociências, Universidade de Évora (UE), Apartado 94, 7002-554 Évora; e-mail: cal@uevora.pt

² Dep. de Engenharia Rural, Universidade de Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora; e-mail: agf@uevora.pt

minantes: decresce o salpico e aumenta o transporte submerso. Em consequência aumenta também a diferença entre perda de solo e taxa de destacamento, o que obriga a recorrer a estimativas da taxa de destacamento independentes das condições de transporte, para estudar a relação do destacamento e da susceptibilidade do solo com a altura de água.

ABSTRACT

Interrill erosion is significant mainly when there is a shallow runoff layer. For this situation raindrop impact acts simultaneously detaching particles and increasing runoff transportation. This paper includes a review of the runoff depth effect on rain detachment and presents some results of experiments on rain detachment with a water layer at soil surface, applying a simple technique of water depth control by splash-cups immersion and enables to collect sediments subjected to aerial (splash) and submersed transport. Experiments consisted in 30 minutes of rain simulations, characterised by 3.2 mm diameter raindrops, 20, 40 and 80 mm/h intensities, 35%, 50% e 65% of kinetic energy relative to kinetic energy with terminal velocity and 0, 1, 2, 3, 5 e 10 mm depth water layers. Materials included samples of commercial sand and the Ap horizon of three soils A, Pg and Vx, at family level of the Portuguese Classification, respectively an Eutric Fluvisol, an Eutric Cambisol and a Chromic Luvisol according to FAO/Unesco Classification. All samples were prepared in cylindrical splash-cups with 9,2 cm of internal diameter. Splash decreases very quickly with the water layer

depth and can be neglected for depths of 2 mm or more. Total soil loss is maximum for water depths about 2 to 3 mm, or 2/3 to 3/3 the drop diameters. For higher water depths, decreases linearly for sand and for A and Pg soils. In case of Vx soil decreases more closely to a negative exponential. For lower water depths, submerged transport of sediments falls quickly to zero while splash increases strongly. Because sediment transport processes differ markedly between the absence and the presence of a thin water layer at soil surface, the relationship between detachment rate and water depth just makes sense if detachment rates are independent of transport conditions.

INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

A erosão intersulcos apresenta maior importância quando se forma uma película de escoamento à superfície do solo (Figura 1), situação em que o impacto das gotas provoca o destacamento de partículas e, simultaneamente, aumenta a capacidade de transporte do escoamento, envolvendo um mecanismo que se pode designar como *transporte no escoamento induzido pela chuva* (TEIC)¹. O destacamento de partículas pelo impacto das gotas de chuva constitui um processo indispensável em todos os modelos de erosão com maior fundamentação física, nomeadamente, o WEPP (Nearing et al., 1990), o EUROSEM (Morgan, 1994) e o GUEST (Ghadiri & Rose, 1992). No entanto, não existe consenso acerca do efeito que a altura de água à superfície do solo exerce no destacamento pela chuva: o WEPP (Nearing et al., 1990) não considera este efeito, o EURO-

¹ Rain Induced Flow Transportation (RIFT) (Kinnell, 1988).

Efeito da altura de água à superfície do solo na erosão intersulcos

Effect of soil surface water depth on interrill soil erosion

C. Alexandre¹ & A. G. Ferreira²

¹*Dep. de Geociências, Universidade de Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora;
e-mail: cal@uevora.pt*

²*Dep. de Engenharia Rural, Universidade de Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora;
e-mail: agf@uevora.pt*

RESUMO

A erosão intersulcos tem significado principalmente quando se forma uma película de escoamento superficial, situação em que o impacte das gotas destaca partículas da superfície do solo e, simultaneamente, aumenta a capacidade de transporte do escoamento. Para estas condições é importante conhecer como varia a taxa de destacamento e a susceptibilidade dos solos ao destacamento pela chuva com a altura da película de escoamento. Neste artigo faz-se uma revisão da influência da altura do escoamento sobre o destacamento pela chuva e apresentam-se resultados de ensaios sobre o mesmo tema usando uma técnica simples de controlo da altura de água por imersão de caixas de destacamento (“splash-cups”) que permite a recolha do transporte aéreo e do transporte submerso de sedimentos pelo impacte de gotas. Realizaram-se ensaios de simulação de chuva de 30 minutos, com gotas de 3,2 mm de diâmetro, aplicando intensidades de 20, 40 e 80 mm/h, com 35%, 50% e 65% da energia cinética das gotas com velocidade terminal e alturas de água à superfície do solo (h) de 0, 1, 2, 3, 5 e 10 mm, recorrendo a amostras de uma areia comercial e do horizonte Ap de três solos das famílias A, Pg e Vx, da classificação portuguesa (Classificação da FAO/Unesco, respectivamente: Fluvissole Eutrício, Cambissolo Eutrício e Luvissole Crómico) em caixas de destacamento de 9,2 cm de diâmetro interno. O salpico decresce bruscamente com a altura da camada de água sobre o solo, sendo negligenciável para $h > 2$ mm. A perda de solo atinge um máximo para $h = 2-3$ mm, ou $2/3$ a $3/3$ do diâmetro das gotas. Para alturas superiores, decresce de forma quase linear no caso da areia e dos solos A e Pg, e segundo uma exponencial negativa no caso do Vx. Para alturas de água inferiores, o salpico aumenta e o transporte na lâmina de água decai rapidamente para

zero. Basta uma ligeira película de água ($h < 1$ mm) para alterar substancialmente os mecanismos de transporte dominantes: decresce o salpico e aumenta o transporte submerso. Em consequência aumenta também a diferença entre perda de solo e taxa de destacamento, o que obriga a recorrer a estimativas da taxa de destacamento independentes das condições de transporte, para estudar a relação do destacamento e da susceptibilidade do solo com a altura de água.

ABSTRACT

Interrill erosion is significant mainly when there is a shallow runoff layer. For this situation raindrop impact acts simultaneously detaching particles and increasing runoff transportation. This paper includes a review of the runoff depth effect on rain detachment and presents some results of experiments on rain detachment with a water layer at soil surface, applying a simple technique of water depth control by splash-cups immersion and enables to collect sediments subjected to aerial (splash) and submersed transport. Experiments consisted in 30 minutes of rain simulations, characterised by 3,2 mm diameter raindrops, 20, 40 and 80 mm/h intensities, 35%, 50% e 65% of kinetic energy relative to kinetic energy with terminal velocity and 0, 1, 2, 3, 5 e 10 mm depth water layers. Materials included samples of commercial sand and the Ap horizon of three soils A, Pg and Vx, at family level of the Portuguese Classification, respectively an Eutric Fluvisol, an Eutric Cambisol and a Chromic Luvisol according to FAO/Unesco Classification. All samples were prepared in cylindrical splash-cups with 9,2 cm of internal diameter. Splash decreases very quickly with the water layer depth and can be neglected for depths of 2 mm or more. Total soil loss is maximum for water depths about 2 to 3 mm, or $2/3$ to $3/3$ the drop diameters. For higher water depths, decreases linearly for sand and for A and Pg soils. In case of Vx soil decreases more closely to a negative exponential. For lower water depths, submerged transport of sediments falls quickly to zero while splash increases strongly. Because sediment transport processes differ markedly between the absence and the presence of a thin water layer at soil surface, the relationship between detachment rate and water depth just makes sense if detachment rates are independent of transport conditions.

INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

A erosão intersulcos apresenta maior importância quando se forma uma película de escoamento à superfície do solo (Figura 1), situação em que o impacto das gotas provoca o destacamento de partículas e, simultaneamente, aumenta a capacidade de transporte do escoamento, envolvendo um mecanismo que se pode designar como *transporte no escoamento induzido pela chuva* (TEIC)¹. O destacamento de partículas pelo impacto das gotas de chuva constitui um processo indispensável em todos os modelos de erosão com maior fundamentação física, nomeadamente, o WEPP (Nearing et al., 1990), o EUROSEM (Morgan, 1994) e o GUEST (Ghadiri e Rose, 1992). No entanto, não existe consenso acerca do efeito que a altura de água à superfície do solo exerce no



Figura 1 – Exemplo de escoamento em que o transporte pode ser induzido pelo impacto de gotas.

destacamento pela chuva: o WEPP (Nearing et al., 1990) não considera este efeito, o EUROSEM (Morgan, 1994), o SHE (Sutherland et al., 1996) e o GUEST (Ghadiri e Rose, 1992), admitem uma relação decrescente entre destacamento e altura de água mas com abordagens diferentes. Na bibliografia encontram-se também resultados contraditórios relativamente a esta questão (Bryan, 2000). Neste artigo faz-se um ponto da situação sobre a influência da altura de água à superfície do solo no destacamento pelo impacto de gotas e apresentam-se resultados de ensaios de simulação de chuva.

INFLUÊNCIA DA ALTURA DE ÁGUA À SUPERFÍCIE DO SOLO NA EROSÃO INTERSULCOS

Os factos evidenciam que a partir de um certo limite de altura de água, o impacto das gotas tem um efeito progressivamente decrescente sobre a superfície do solo, uma vez que quanto maior é a altura de água menor é a fracção da energia que atinge a superfície. Consequentemente o destacamento e a perda de solo decrescem a partir de

¹ Rain Induced Flow Transportation (RIFT) (Kinnell, 1988).

certo nível de altura de água. Ekern (1953), referiu o trabalho de King (não publicado e sem data) que mostra que, "mesmo delgadas lâminas de água sobre o solo, absorvem o impacto das gotas de chuva reduzindo substancialmente a perda de solo. Uma camada de 1/2 polegada (12,7 mm) oferece protecção completa à estrutura do solo.". Este parece ser o ponto que reúne mais consenso (Palmer, 1964; Green e Houk, 1980; Moss e Green, 1983; Moss, 1988; Kinnell, 1988, 1990b, 1991). São mais incertas outras questões como: a expressão que traduz o decréscimo da perda de solo; o nível de altura de água a partir do qual se verifica esse decréscimo e, caso esse valor seja superior a zero, qual a expressão verificada nesse intervalo inicial próximo da altura de água nula.

A incerteza nestas questões parece estar relacionada, pelo menos em parte, com os tipos de observações efectuadas por cada autor. Convém salientar que quando existe uma película de escoamento à superfície do solo o material projectado no salpico não pode reflectir a totalidade do material destacado pela chuva, dado que não inclui a fracção de partículas deslocadas que permanecem sob o escoamento. Por outro lado, devido ao processo de deposição a que estão sujeitas todas as partículas que se deslocam no escoamento, também não é razoável admitir a equivalência entre a taxa de destacamento e a perda de solo (material que sai da área de estudo, transportado no escoamento ou projectado no salpico), como frequentemente se admite quando o impacto de gotas se dá directamente sobre a superfície do solo e o único meio de transporte actuante é o salpico. Dada a dificuldade em determinar a taxa de destacamento (que é independente das condições de transporte), geralmente é analisado o efeito da altura de água sobre a perda de solo. Assim, parece lógico fazer a divisão dos estudos consoante os processos de transporte observados: baseados no transporte aéreo dos sedimentos (salpico) ou no transporte em escoamento induzido pela chuva.

TRANSPORTE AÉREO OU SALPICO

Verifica-se que os resultados do salpico apresentam um comportamento mais homogéneo, decrescendo desde a altura de água nula e atingindo valores quase desprezáveis para alturas entre 2 mm (Ghadiri e Payne, 1986) e 3 mm (Schultz et al., 1985). Moss e Green (1983), com gotas de 5,1 mm de diâmetro, obtiveram valores mensuráveis para 20 mm de altura de água, mas assinalam também um forte decréscimo do salpico entre 0 e 2 mm e Moss (1988) considera que o salpico é praticamente negligenciável para alturas de água a partir de 2 mm.

A existência de uma camada de água à superfície do solo prolonga o processo de salpico mas não a deslocação de material. Os ângulos de largada das gotículas do salpico, medidos por Mutchler e Hansen (1970), indicam um aumento desde pouco mais de 40 graus, para alturas de água quase nulas, até à estabilização nos 80 graus, a partir de alturas de água de cerca de $1/2$ do diâmetro das gotas (D). Poesen e Savat (1981), refere um acentuado decréscimo na transportabilidade do salpico com a formação de uma película de água à superfície do solo, atribuindo o facto ao rápido aumento do ângulo de projecção do salpico.

A inclinação da superfície torna a relação entre salpico e altura de água mais complexa, como mostra Sutherland et al. (1996). Com a altura média de água sobre o solo calculada a partir do escoamento, e inclinações de 5° , 10° e 20° , verifica-se para 5° , que o máximo do salpico é obtido com altura de água nula, decrescendo suavemente até à altura de $2,5xD$. Aumentando a inclinação aumenta o salpico e a altura de água em que se atinge o máximo do salpico: $0,7xD$ para 10° e $1,5xD$ para 20° .

Conclui-se que o transporte aéreo diminui substancialmente com o aumento da altura de água, devido ao menor alcance do salpico, mas, provavelmente, também devido à menor capacidade para incorporar partículas da superfície do solo na fase de expansão da coroa, eventualmente por se formar uma camada limite maior.

TRANSPORTE NUMA CAMADA DE ÁGUA COM IMPACTE DE GOTAS

Relativamente aos sedimentos transportados no escoamento superficial e destacados unicamente pelo impacte de gotas, não é difícil admitir que deverá existir uma primeira fase de aumento do transporte com o aumento da altura de água. Com efeito, para uma altura de água nula o transporte de sedimentos no escoamento é necessariamente nulo. Por outro lado, vimos que acima de determinada altura de água o impacto de gotas tende a ser completamente amortecido na camada de água. Assim, terá que existir um nível de altura do escoamento em que o transporte de sedimentos atinge um máximo. Essa altura de água corresponde à maximização da acção conjugada de transporte dos sedimentos e de destacamento pelo impacte das gotas. Eventualmente, pode ocorrer já numa fase decrescente da acção de destacamento, desde que esse decréscimo seja compensado por uma maior eficiência do transporte de sedimentos.

Palmer (1964), designou por *altura crítica* a altura de água em que observou o valor máximo da perda de solo. Mediu também a pressão exercida no fundo pelo

impacte de gotas sobre uma película de água. Verificou a existência de um máximo de pressão e de transporte de sedimentos para valores da altura crítica aproximadamente iguais ao diâmetro das gotas ($1xD$). A partir desse nível os sedimentos recolhidos decresceram de forma quase linear para as gotas de 2,9 mm e aproximadamente segundo uma exponencial negativa para as gotas de 4,7 e 5,9 mm de diâmetro.

Os dados de Moss e Green (1983), indicam uma altura crítica mais elevada entre 2 e $3xD$. A partir desse nível verificou-se também um decréscimo acentuado no transporte, expresso por uma relação exponencial negativa entre a concentração de sedimentos e a altura de água, segundo a análise de Kinnell (1988). Mais tarde, Kinnell (1990b) substituiu esta relação exponencial por uma relação linear entre a concentração de sedimentos e o inverso da altura de água ($1/h$), para valores de h entre 2 mm e $3xD$. Verificou-se que a mesma relação era aplicável também a solos, no intervalo $3,3 < h < 8-9$ mm. Kinnell (1991) verificou ser possível aplicar também uma relação linear entre o fluxo de transporte de sedimentos e a altura do escoamento, para o mesmo intervalo de 2-3 mm a $3xD$. Esta relação foi obtida em ensaios com gotas de 2,7 e 5,1 mm de diâmetro, areias de 0,11, 0,2 e 0,9 mm de diâmetro, chuvadas de 64 mm.h^{-1} e velocidade do escoamento de 4 cm.s^{-1} , considerada insuficiente para destacar as areias usadas. Para além da proposta de Kinnell (1991) – relação linear entre a perda de solo e a altura do escoamento – outros tipos de relações têm sido sugeridos. As expressões seguintes pretendem exprimir relações da taxa de destacamento com a altura de água à superfície. São usados os símbolos adoptados pelos respectivos autores.

Com base nos dados de Palmer, 1965, Park et al., (1982) sugerem:

$$\frac{W_s}{W_d} = a \cdot e^{-b \cdot \frac{h}{D}} \cdot f_3(V_T/V_s, \partial)$$

em que W_s/W_d é a razão entre a massa de solo no salpico e a massa das gotas, h/D é a relação da altura de água com o diâmetro das gotas, e é a função exponencial, a e b são parâmetros, f_3 é a função de W_s/W_d para a situação de impacte directo de gotas sobre o solo e que depende de V_T/V_s , relação entre a velocidade da gota no impacte e a velocidade inicial das partículas após o impacte e ainda de ∂ , o declive. Entre as gotas apresentadas, de 2,9, 4,7 e 5,9 mm de diâmetro, a expressão anterior revela um melhor ajustamento aos resultados da taxa de erosão das gotas de 2,9 mm e que são também as que apresentam a mais elevada relação W_s/W_d . Em todos os casos se verifica um

decréscimo mais rápido da taxa adimensional W_s/W_d a partir de $h/D \approx 1$, atingindo valores praticamente nulos para h/D entre 5 e 6.

Usando uma relação empírica de Wang e Wenzel, em 1970, obtida pela da pressão de impacte de gotas de vários diâmetros (D_i), velocidades de impacte (V_i) e diferentes alturas da camada de água à superfície (h), Gilley et al. (1985), sugerem a seguinte expressão para a taxa de destacamento do solo (D_s), válida apenas para $D_i/h < 1$:

$$D_s = 0,2K_d \rho \cos^2 \theta \sum_{i=1}^n a_i \cdot V_i^2 \left(\frac{D_i}{h} \right)^{1,83}$$

em que, além das variáveis já indicadas, K_d é um parâmetro de destacamento do solo, ρ é a densidade da água, θ é ângulo da superfície onde se dá o impacte, a_i é o número de gotas com o mesmo diâmetro e n o número de classes de diâmetro das gotas.

Hairsine (1988) e Hairsine e Rose (1991), traduzem a relação do destacamento com a espessura da camada de água como:

$$\begin{cases} e = a_0 P^p; & \text{para } h \leq h_0 \\ e = a_0 \left(\frac{h_0}{h} \right)^b P^p; & \text{para } h > h_0 \end{cases}$$

em que e é a taxa de destacamento, P é a intensidade da chuva, a_0 é o parâmetro da destacabilidade do solo quando não existe uma camada de água sobre o solo ou quando a altura dessa camada (h) não excede o valor h_0 , p e b são expoentes adimensionais. Nesta abordagem a destacabilidade do solo, a_0 , é máxima e mantém-se constante para alturas de água $h < h_0$, decrescendo assintoticamente para zero quando $h \gg h_0$.

Segundo Fukada et al. (1992b), o volume de partículas destacadas (e_v), para $h > 0,3-0,4$ vezes a altura máxima da cavidade, varia segundo (em que a é constante):

$$e_v = a \frac{1}{h^2}$$

O modelo de erosão EUROSEM considera a seguinte relação entre o destacamento e a altura do escoamento superficial (Morgan, 1994):

$$DET = k \cdot KE^{1,0} \cdot e^{-2,0h}$$

sendo DET a taxa de destacamento pelo impacte de gotas ($m^3 \cdot s^{-1}$), k um índice de destacabilidade (g.J), KE a energia cinética da chuva ($J \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$), h a altura média de

água à superfície (m) e e a função exponencial. O expoente que multiplica por h , segundo um estudo de Torri e associados, pode apresentar valores entre 0,9 e 3,0, dependendo da textura do solo (Morgan, 1994). Contudo, é adoptado o valor intermédio 2,0 por não existir ainda conhecimento experimental suficiente (Morgan, 1994).

Nenhuma destas propostas contempla a existência de uma fase crescente da taxa de destacamento até uma eventual altura crítica.

PERDA DE SOLO TOTAL

A questão de saber como varia a perda de solo total, considerada como a soma do material recolhido no salpico e no escoamento superficial, coloca-se principalmente para o intervalo entre zero e a altura água crítica. Como vimos, neste intervalo o salpico decresce rapidamente com h mas, em contrapartida, o transporte submerso aumenta. Parece difícil nestas condições avaliar se o total apresentará uma tendência global crescente em direcção à altura crítica, decrescente ou mesmo constante. Poderão até ocorrer todas essas hipóteses. Mais difícil é saber como varia a taxa de destacamento neste mesmo intervalo. Para isso será necessário considerar um modelo adequado para condições de transporte, quer para o salpico quer para o escoamento superficial.

DESTACAMENTO

O estudo do impacte de gotas sobre uma película de água permite identificar uma sequência de fases relevantes para o destacamento (Engel, 1966, 1967; Tuong e Painter, 1974; Macklin e Metaxas, 1976; Adler, 1979; Ghadiri e Payne, 1980; Moss e Green, 1983; Ferreira e Singer, 1985; Ferreira et al., 1985; Fukada et al. 1992a). A fase inicial de expansão da cavidade e de formação da coroa contribuem com algum destacamento de partículas, parte das quais são projectadas no salpico. Contudo, esta fase de destacamento torna-se negligenciável mesmo para pequenas alturas da película de água (acima de 2 mm), tornando-se preponderante o destacamento durante a fase de recessão da cratera e de formação do jacto de Rayleigh. Dependendo do grau de desenvolvimento do jacto, também a fase de colapso pode contribuir com mais destacamento de partículas que sofrem depois um certo efeito de disseminação radial.

Parece, pois, admissível que a taxa de destacamento tenha uma fase inicial de aumento com a altura de água, eventualmente até cerca de $1xD$. Podemos tomar como

indicações nesse sentido a maior complexidade do processo de impacte quando a altura de água aumenta até certo nível. Mutchler e Hansen (1970), descreveram este efeito através da medição de parâmetros como o tempo em que a coroa atinge o seu máximo e a altura e a largura máximas da coroa, tendo verificado que valores máximos desses parâmetros foram atingidos para alturas de cerca de $1/3xD$, decrescendo ligeiramente a partir daí, até estabilizarem para alturas de água superiores a $3xD$. Mais importante ainda, verifica-se que o aumento da altura de água confere maior expressão às fases seguintes de recessão da cratera e de colapso do jacto de Rayleigh, cuja contribuição para o destacamento pode ser superior à fase de desenvolvimento da cratera (Ferreira e Singer, 1985; Ferreira et al., 1985; Moss e Green, 1983; Tuong e Painter, 1974). Portanto, se a abertura da cratera diminui a sua eficiência de destacamento para alturas superiores a $1/3xD$ (Mutchler e Hansen, 1970), o levantamento de partículas nas fases posteriores de formação e colapso do jacto de Rayleigh, deve ainda aumentar até alturas ligeiramente superiores. Acima de certo nível a dissipação da energia do impacte realiza-se apenas na camada de água, diminuindo a perturbação sobre o fundo. Assim, é de admitir uma altura de água crítica em que a eficiência de destacamento é máxima.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para uma descrição mais detalhada ver Alexandre (1998a). Usaram-se 3 solos diferentes e uma areia (**AR**) constituída por partículas das classes 0,25-0,5 e 0,5-1,0 mm em proporção aproximadamente igual. O material terroso foi recolhido nos 10 cm superficiais de solos pertencentes às seguintes famílias da classificação portuguesa (Cardoso, 1965), ou às seguintes unidades-solo do sistema WRBSR (FAO et al., 1998):

- A** - Aluviossolo Moderno Não Calcário de textura mediana (Fluvisolo Eutrício). Solo franco, na transição para franco-limoso, de Alvalade do Sado.
- Pg** - Solo Litólico Não Húmico Pouco Insaturado, Normal, derivado de granitos (Cambissolo Eutrício). Solo franco-arenoso da Herdade da Mitra, Évora.
- Vx** - Solo Mediterrâneo Vermelho de Materiais Não Calcários, Normal, derivado de xistos (Luvisolo Crómico). Solo franco de Vale Formoso, Mértola.

No Quadro 1 caracterizam-se as camadas superficiais destes solos. Utilizou-se a fracção granulométrica <4 mm, em caixas de destacamento com 9,2 cm de diâmetro interno e 7 cm de altura útil (Ellison, 1947a; Mazurak e Mosher, 1968 e 1970; Proffitt et al., 1989; Rose, 1960 e 1961; Schultz et al., 1985 e Woodburn, 1948). As amostras

foram saturadas durante 12 h com a mesma água desionizada da simulação de chuva (condutividade eléctrica $<60 \mu\text{S m}^{-1}$). O simulador de chuva, baseado em Munn (1976), é gotas uniformes de 3,2 mm diâmetro. Aplicaram-se três intensidades objectivo, 20, 40 e 80 mm/h e alturas de queda de 1,13 1,5 2,5 e 3,68 m, fornecendo 27, 35, 50 e 65% de energia cinética relativa (ECR – percentagem da energia cinética com a velocidade terminal das gotas; cálculos baseados em Epema e Riezebos, 1983). Em todos os ensaios a intensidade efectiva foi igual à intensidade nominal $\pm 10\%$ (maioritariamente $\pm 5\%$) e a variação da intensidade entre o início e o fim dos ensaios foi $<10\%$. A água à superfície do solo teve alturas nominais de 0, 1, 2, 3, 5 e 10 mm. Para cada modalidade efectuaram-se 3 ensaios de 30 minutos com recolha de sedimentos de 5 em 5 minutos.

Quadro 1 - Caracterização da camada superficial dos solos

Características	Unidades	Solos		
		A	Pg	Vx
Textura⁽¹⁾				
Areia grossa	(%)	6.6	45.4	33.3
Areia fina	(%)	47.0	35.6	24.0
Limo	(%)	28.3	9.8	22.0
Argila	(%)	18.1	9.2	20.7
Estabil. agregação⁽¹⁾				
Coef. de agregação	(%)	11,3	6,5	6,6
Rel. dispersão Middleton		0,89	0,93	0,93
Minerais de argila⁽²⁾				
Caulinite	(%)	35 - 45	50 - 60	40 - 50
Micas	(%)	35 - 45	35 - 45	40 - 50
Vermiculites	(%)	-	< 5	< 5
Interestratificados clorite-vermiculite	(%)	10 - 20	-	-
Análises químicas⁽³⁾				
Ca ⁺⁺	(cmol _c .kg ⁻¹)	6.08	3.08	1.82
Mg ⁺⁺	(cmol _c .kg ⁻¹)	2.10	0.48	1.08
K ⁺	(cmol _c .kg ⁻¹)	0.45	0.41	0.21
Na ⁺	(cmol _c .kg ⁻¹)	0.59	0.17	0.25
S	(cmol _c .kg ⁻¹)	9.22	4.14	3.36
C.T.C.	(cmol _c .kg ⁻¹)	10.00	4.90	5.20
Grau sat. bases (V)	(%)	92.2	79.6	68.6
Na / C.T.C.	(%)	5.9	3.5	4.8
pH (H ₂ O)		6.9	5.9	5.8
pH (KCl)		-	4.4	4.7
M.O.	(%)	-	2.7	3.6
N org.	(ppm)	1400	1582	2716
Fe livre	(cmol _c .kg ⁻¹)	-	9.9	82.2

¹ Departamento de Geociências da U.E.; médias de 3 repetições.

² Departamento de Ciências do Ambiente do I.S.A.

³ Laboratório Químico-Agrícola da U.E.; médias de 3 repetições.

Schultz et al. (1985) e Proffitt et al. (1989) controlaram a altura de água com a parede das próprias caixas de destacamento. Este método tem o inconveniente de poder reduzir o transporte de sedimentos para o exterior da amostra. Para eliminar esta interferência utilizou-se uma tina com uma abertura central, onde se insere a caixa de destacamento, e que tem duas funções: regular a altura de água e recolher os sedimentos transportados sob a lâmina de água (Alexandre, 1998a; 1998b). Com esta técnica a superfície do solo é nivelada pela bordadura da caixa, qualquer que seja a altura de água pretendida. Para medir a altura de água sobre a bordadura das caixas (h_b) utilizou-se um deflectómetro adaptado para o efeito (Alexandre, 1998a). Verificou-se que a média da altura de água se situou, em 95% dos casos, no intervalo da estimativa da média da altura de água $\pm 0,125$ mm. A altura de água sobre o solo (h_s) corresponde à altura sobre a bordadura das caixas mais a descida da superfície do solo (d_b) devido à saída de sedimentos, obtida por estimativa e por medição directa da descida da superfície do solo, no final dos ensaios (Alexandre, 1998a).

A tina que envolve a caixa de destacamento e que serve de *colector do transporte submerso* constitui uma versão circular do tipo de colectores usados por Kinnell, (1988, 1990 e 1991), Moss e Green (1983) e Moss (1988). As partículas projectadas no ar são recolhidas num *colector do salpico* do tipo usado por Proffitt et al. (1989).

Nos ensaios com $h_b > 0$ o solo estava saturado e não houve drenagem das amostras, nos ensaios com $h_b = 0$ permitiu-se a drenagem das amostras com diferenças de carga de 5 cm (490,5 Pa) para a areia e o solo Vx e de 10 cm (981 Pa) nos solos A e Pg.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios simulam o escoamento superficial numa superfície com declive nulo. Nestas condições as partículas são destacadas pelo impacte das gotas e são sujeitas a transporte aéreo (salpico) e transporte submerso – o conjunto constitui a perda de solo (Q_s), expressa por unidade de área e de tempo ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Analisa-se primeiro o efeito da altura de água com base nas médias dos 30 minutos de duração dos ensaios. Na areia, com $h_b > 0$, os valores do salpico foram muito baixos, representando no máximo 0,6% da perda total para $h_b = 2$ mm. Também nos solos o salpico decresce rapidamente quando aumenta a altura da camada de água à superfície. Em todos os ensaios com $h_s \geq 3$ mm

obtiveram-se valores $<0,1 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. As proporções mais altas do salpico foram sempre $<15\%$ do total de sedimentos e ocorreram com $h_b=1 \text{ mm}$ (h_s entre 1,8 e 2,0 mm), 40 mm/h de intensidade e 50 ou 65% ECR. O decréscimo acentuado do salpico com a altura de água concorda com os resultados de diversos outros autores (Ghadiri e Payne, 1986; Moss e Green, 1983; Moss, 1988; Poesen e Savat, 1981).

Com uma película de água à superfície verifica-se uma alteração substancial no padrão de transporte de sedimentos diminuindo o salpico e passando grande parte da perda de solo a dever-se à acção do transporte submerso (Figura 2).

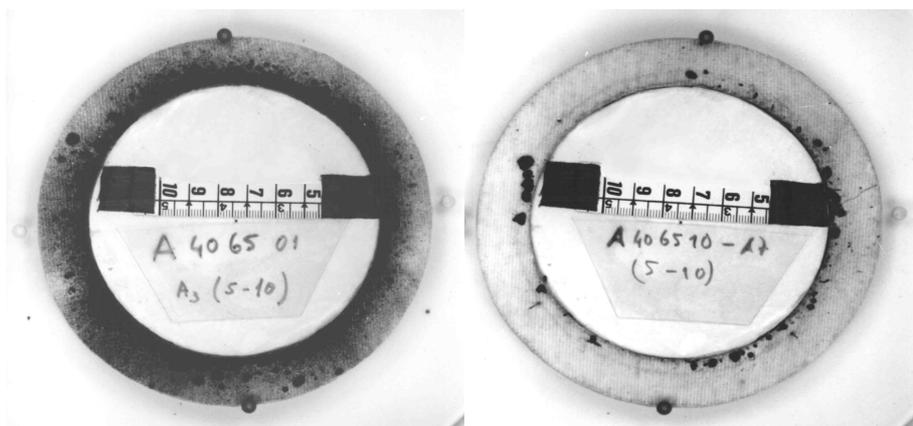


Figura 2 - Anéis com partículas expulsas pelo transporte submerso. Solo A, chuvada de 40 mm/h e 65% ECR. com alturas de água de 1 mm (à esquerda) e 10

Uma relação linear descreve razoavelmente a variação da perda de areia com a altura de água à superfície (Figura 3). As regressões têm elevada significância ($p<0,0005$) com coeficientes de determinação à volta de 0,9 (Quadro 2).

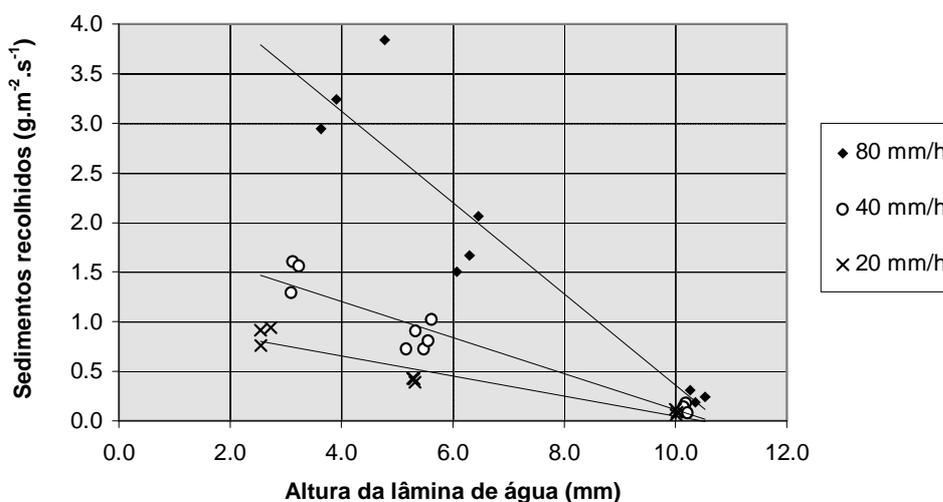


Figura 3 - Transporte submerso vs. altura de água: areia, chuva de 65% ECR. (Quadro 2).

O solo Vx apresenta uma acentuada tendência decrescente da perda de sedimentos com a altura de água que justifica o ajustamento de uma função exponencial negativa (Quadro 2). Para tal pode contribuir o facto da areia e do saibro deste solo serem constituídas em grande parte por partículas de forma achatada. Esta forma pode facilitar a permanência das partículas na camada limite a partir de valores de altura de água mais baixos, dificultando também os mecanismos de transporte por rolamento e saltação.

Quadro 2 - Regressões da perda de solo, Q_s ($\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), com a altura de água à superfície, h_s (mm). Regressão linear para a areia e exponencial para o solo Vx.

Ref. (Int ECR)	Regressão $Q_s = a_h \cdot h_s - b_h$						Signif. ⁽²⁾		
	n	a_h ($\text{g.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}.\text{s}^{-1}$)	i.c. ⁽¹⁾	b_h ($\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	i.c.	r^2	F	prob.	
Areia									
20 65	9	1,06	$\pm 0,19$	-0,10	$\pm 0,03$	0,92	75,6	5,3E-05	
40 65	11	1,93	$\pm 0,29$	-0,18	$\pm 0,04$	0,91	87,1	6,3E-06	
80 65	9	4,96	$\pm 1,17$	-0,46	$\pm 0,16$	0,87	47,6	2,3E-04	
Ref. (Int ECR)	Regressão $Q_s = a_h \cdot e^{(b_h \cdot h_s)}$						Signif. ⁽²⁾		
	n	$\log(a_h)$ (log)	i.c. ⁽¹⁾	a_h ($\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	b_h ($\text{g.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}.\text{s}^{-1}$)	i.c.	r^2	F	prob.
Solo Vx									
40 65	12	0,64	$\pm 0,43$	1,91	-0,35	$\pm 0,07$	0,92	118,0	7,4E-07

¹ Intervalos de confiança para 95% de probabilidade.

² Todas as regressões são significativas para um nível $\alpha = 0,001$.

Com base nas médias para os 30 minutos de duração dos ensaios, verifica-se que os valores máximos de sedimentos recolhidos ocorreram entre cerca de 2 e 4,5 mm da altura de água, respectivamente com o solo Vx e com a areia na modalidade de 80 65; as restantes modalidades da areia e os solos A e Pg apresentam valores máximos num intervalo entre 2,5 e 3,5 mm. Estas alturas de água, correspondentes aos máximos da perda de solo, devem ser interpretadas com cuidado dado que variam consoante o tempo total de medição. Como a saída de sedimentos implica a descida da superfície, verifica-se que quanto maior é o período de tempo considerado maior é a altura de água média e menor a taxa média de perda de sedimentos. Assim, as alturas de água com os valores mais altos de perda de solo, podem não corresponder efectivamente às alturas críticas.

Verificou-se que nos momentos iniciais (0-5 minutos), as modalidades sem água à superfície apresentam perda de solo semelhante ou mesmo superior à dos ensaios com $h_b > 0$ (Alexandre, 1998a). Na ausência de uma película de água, devido à maior e/ou mais rápida alteração da superfície do solo, forma-se uma crosta mais resistente e,

portanto, ao utilizar as médias para os 30 minutos estamos a relacionar a perda de solo com a altura de água em condições da superfície bastante diferentes.

Reduz-se o efeito de alteração da superfície se considerarmos os valores médios para o intervalo 0-10 minutos, embora se aumente o risco de maior variabilidade nas condições iniciais das amostras. Na análise seguinte incluem-se também os resultados de alguns ensaios de 10 minutos de duração em que a superfície das amostras foi nivelada abaixo da bordadura das caixas de destacamento ($d_b > 0$). Admite-se a utilização desses dados uma vez que as perdas de solo com desníveis iniciais de 2 e 4 mm não foram significativamente diferentes das modalidades equivalentes com $d_b = 0$ (Alexandre, 1998a). Contudo, nas amostras com $d_b > 4$ mm já se faz sentir uma maior interferência da bordadura. Nos gráficos seguintes estes ensaios distinguem-se pela respectiva média de d_b , enquanto os outros têm $d_b = 0$. Indica-se o salpico e o transporte submerso mas não se inclui a perda de solo para manter a inteligibilidade dos gráficos.

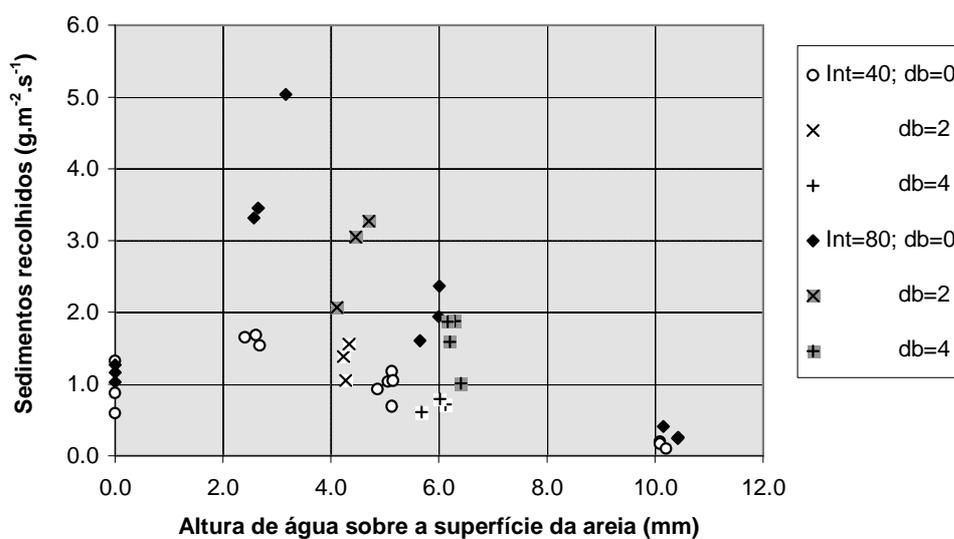


Figura 4 - Perda de sedimentos vs. altura de água à superfície. Areia, chuvadas de 40 e 80 mm/h e 65% ECR, período 0-10 minutos. Incluem-se amostras com a superfície 2 e 4 mm abaixo do rebordo das caixas de destacamento.

Atendendo à uniformidade temporal das taxas de recolha da areia, não se verifica na Figura 4 grande alteração relativamente à Figura 3. Indica-se o salpico apenas para $h_s = 0$ dado que foi praticamente nulo para a altura seguinte (> 2 mm). Os sedimentos recolhidos nas amostras com um desnível inicial $d_b > 0$ integram-se na mesma tendência

geral das amostras com $d_b=0$. Conclui-se que o decréscimo do transporte submerso da areia com a altura de água pode ser razoavelmente representado por uma relação linear.

No solo A (Figura 5), o elevado valor do desnível médio ($d_b=4,7$ mm) sugere maiores erros por defeito. Ocorre um forte decréscimo do salpico com o aumento da altura de água e do transporte submerso para altura de água $< 2,5-3,0$ mm.

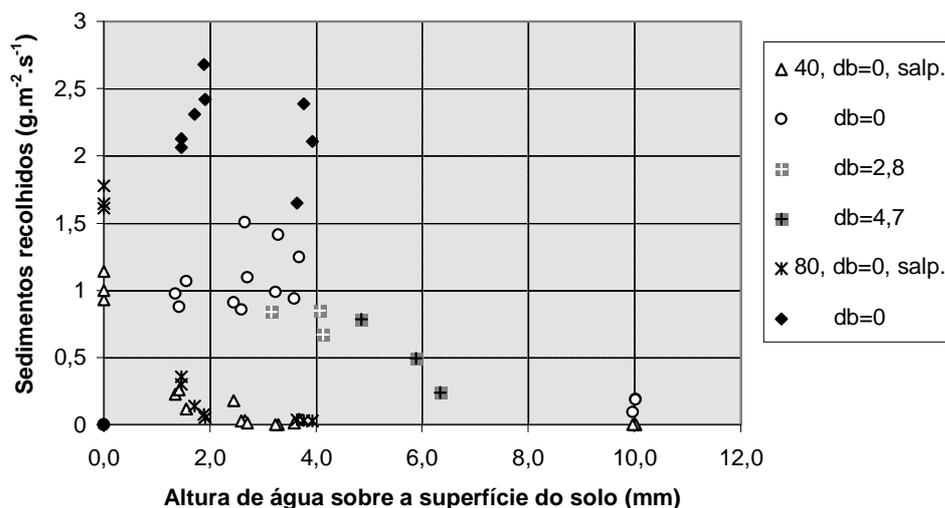


Figura 5 - Salpico e transporte submerso vs. altura de água. Solo A, chuvas de 40 e 80 mm/h e 65% ECR, período 0-10 minutos. Incluem-se amostras com a superfície 2,8 e 4,7 mm abaixo do rebordo das caixas de destacamento.

No solo Pg (Figura 6) as amostras com $d_b>0$ apresentam valores compatíveis com os obtidos para $d_b=0$. Há um decréscimo acentuado do salpico com o aumento da altura de água e o transporte submerso apresenta uma variação com a altura de água que não se afasta muito duma relação linear para valores superiores a 2 mm. O decréscimo do transporte submerso para alturas de água quase nulas não está tão bem representado, mas o limite a partir do qual se verifica essa tendência situa-se entre os 2-3 mm.

No gráfico do solo Vx (Figura 7) evidencia-se a grande dispersão dos valores do salpico para a altura de água nula. Tal dispersão deve-se em grande parte às diferentes condições de drenagem das amostras. As amostras sem drenagem (“s/inf.”) acumularam mais água à superfície mas os dados disponíveis não permitem calcular a altura média verificada, por isso e atendendo à rápida variação do salpico com o aumento da altura de água, optou-se por indicar o salpico dessas amostras em $h_s=0$, mas assinalando os valores, por corresponderem a alturas de água reais entre 0 e 1 mm. Os resultados das

amostras com $d_b > 0$ integram-se bastante bem na evolução apresentada pelas amostras com $d_b = 0$. Incluindo ou não as amostras com rebaixamento da superfície, confirma-se a tendência do solo Vx, para apresentar um decréscimo da perda de solo com a altura de água, mais acentuado do que a areia e os solos A e Pg. Embora com maior dispersão de valores, o intervalo com perdas de solo mais elevadas é grosso modo entre 2 e 4 mm.

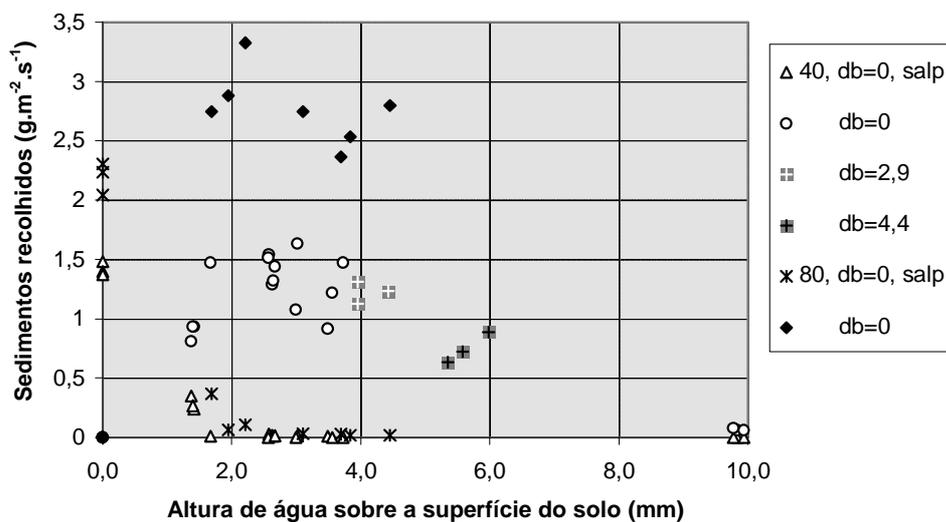


Figura 6 - Transporte aéreo (salp.) e transporte submerso vs. altura de água. Solo Pg, chuvadas de 40 e 80 mm/h e 65% ECR, período 0-10 minutos. Incluem-se amostras com a superfície 2,9 e 4,4 mm abaixo do rebordo das caixas de destacamento.

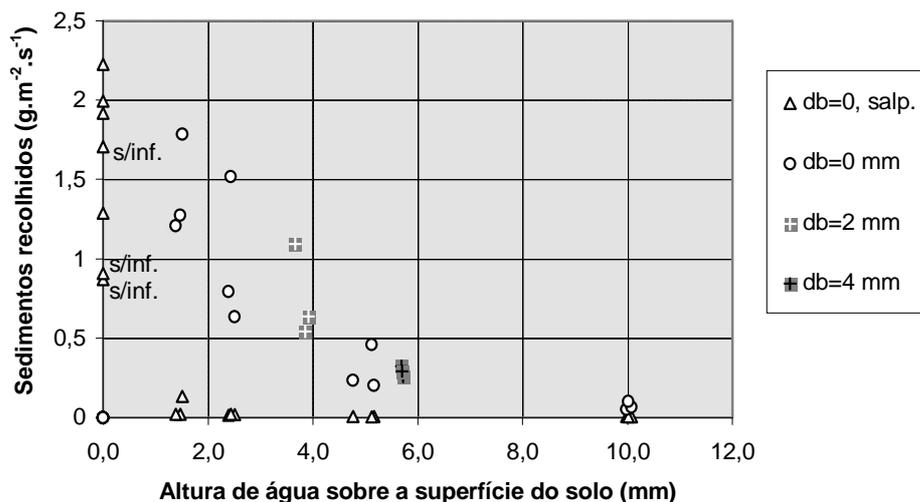


Figura 7 - Transporte aéreo (salp.) e transporte submerso vs. altura de água. Solo Vx, 40 mm/h e 65% ECR, período 0-10 minutos. Incluem-se amostras com superfície 2 e 4 mm abaixo do rebordo das caixas. Os pontos "s/ inf." indicam amostras com $h_b = 0$, sem drenagem.

Observando as Figuras 4 a 7 verifica-se que a variação da perda de solo com a redução da altura de água até zero apresenta um padrão que depende da intensidade da chuva aplicada. No caso da areia e dos solos A e Pg, observa-se para a intensidade de 40 mm/h que a recolha de sedimentos com $h_s=0$ (apenas salpico) é equiparável aos valores da perda solo com as alturas de água mais baixas (até cerca dos 3 mm), mas para a intensidade de 80 mm/h, a perda de solo com $h_s=0$ já é claramente inferior à registada para as alturas mais baixas, (entre 2 e 4 mm). Isto leva-nos a dar atenção, novamente, à variação temporal da perda de solo sem e com água à superfície. Como a evolução da superfície do solo e o decréscimo das taxas de saída de sedimentos são mais rápidos nos casos de impacte directo das gotas, mesmo considerando apenas um período inicial de 10 minutos os valores médios de perda de solo dessas modalidades são mais fortemente reduzidos do que os das modalidades com uma camada de água à superfície e este efeito é tanto maior quanto maior é a intensidade da chuva, dado que para o mesmo período de tempo maior é a energia aplicada e a alteração da superfície. Confirma-se pela evolução temporal (Alexandre, 1998a) que se considerarmos apenas o primeiro intervalo de tempo (0-5 minutos), as taxas de perda de solo dos ensaios sem altura de água são, tanto para 40 mm/h como 80 mm/h, muito próximas das observadas para as alturas de água nominais mais baixas, (1, 2 e 3 mm) e em alguns casos chegam a ser superiores (solos Pg e Vx com intensidade de 40 mm/h e 65% ECR). A areia não confirma estas observações registando-se nos 5 minutos iniciais uma perda de sedimentos $h_b=0$ sempre inferior à observada com $h_b=2$ mm. Este facto significa que a eficiência do destacamento e/ou do transporte pelo salpico é menor na areia do que nos solos estudados. A elevada porosidade e a estabilidade das partículas, podem permitir um melhor escoamento interno da água das gotas durante o impacte, reduzindo assim a componente projectada na coroa.

Na Figura 8 apresentam-se possíveis relações da perda de solo com a altura de água, incluindo os dois tipos de transporte envolvidos: salpico e o transporte submerso. São particularmente especulativas as curvas apresentadas para a altura de água menor que $2/3$ a $3/3$ do diâmetro das gotas (exceptuando o transporte pelo salpico). Em relação ao transporte total são discutíveis, quer a proposta A, com um valor constante, quer a proposta B, com um máximo para uma altura de água que pode não coincidir com a altura crítica para o transporte submerso. Há ainda a considerar que em algumas

modalidades (P_g e V_x com chuvadas de 40 mm/h e 65% ECR) os valores mais altos de perda de solo ocorreram para $h_s=0$. Para esclarecer esta questão será necessário realizar testes sem uma camada de água ($h_s=0$) mas com um controlo mais rigoroso da tensão de humidade aplicada e da água acumulada à superfície no decorrer dos ensaios. A variação do transporte submerso nesta gama de alturas é igualmente incerta, não sendo de excluir, quer a relação apresentada no esquema quer mesmo uma relação linear desde zero até à altura crítica.

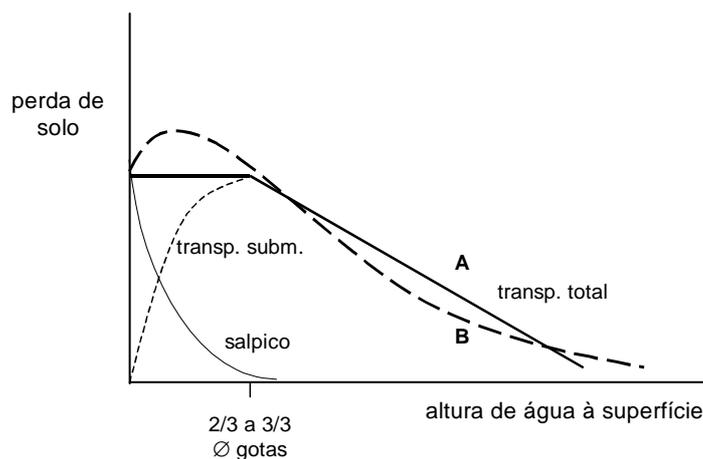


Figura 8 - Esboço da perda de solo com a altura de água à superfície, incluindo o transporte aéreo (salpico) e o transporte submerso.

A relação linear do transporte total para alturas de água superiores ao diâmetro das gotas (proposta A), tem justificação com base nos dados obtidos para areia e para o solo P_g . Contudo, esta não é a única relação possível, com o solo V_x esta fase decrescente parece aproximar-se mais de uma exponencial negativa (mais de acordo com B). Também a relação adoptada por Hairsine e Rose, (1991) apresenta um decréscimo do destacamento com a altura de água mais rápido do que o decréscimo verificado para a areia e para os solos A e P_g .

CONCLUSÕES

- o salpico decresce muito rapidamente com a altura de água sendo, em todos os casos, desprezável a partir dos 2 mm de altura. A partir deste nível são recolhidas essencialmente partículas finas em suspensão nas gotículas projectadas.

- A variação da perda de solo com a altura de água à superfície, atingiu um máximo com alturas entre 2 a 3 mm (2/3 a 3/3 do diâmetro das gotas). Para alturas de água superiores, a perda de solo decresce de forma aproximadamente linear no caso da areia e dos solos A e Pg e segundo uma exponencial negativa no caso do solo Vx. Para alturas de água menores, enquanto o salpico aumenta, o transporte submerso de partículas decai rapidamente para zero. A definição da relação da perda de solo total (salpico + transporte submerso) para níveis abaixo da altura crítica exige estudos com um controlo mais rigoroso da altura de água e da tensão de humidade (altura de água nula). Esta é uma gama de alturas de água muito estreita mas particularmente relevante na erosão intersulcos.
- É duvidoso que a perda de solo reflecta de forma constante a mesma proporção do total de partículas destacadas. Basta uma altura de água <1 mm para se alterarem substancialmente os mecanismos de transporte dominantes, decrescendo o salpico e aumentando o transporte submerso. Com o aumento da camada de água a diferença entre a perda de solo medida e a taxa de destacamento é potencialmente mais significativa. Estas alterações nos processos de transporte dificultam o estudo da relação da taxa de destacamento com a altura de água à superfície do solo, tornando-se necessário dispor de um modelo que descreva adequadamente as condições de transporte a que são sujeitas as partículas destacadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandre, C.A.J. 1998a. *Efeito da Chuva e da Altura do Escoamento na Erosão Intersulcos. Transporte de Sedimentos numa Camada de Água com Impacte de Gotas*. Tese de doutoramento. Universidade de Évora.
- Alexandre, C. A. J. & Ferreira, A. G. 1998b. A susceptibilidade dos solos ao impacto da chuva: uma revisão da técnica dos “splash-cups” e um método que permite a aplicação de uma película de água à superfície. *Pedon*, 12: 135-148.
- Bryan, R.B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32: 385-415.
- Cardoso, J.V.J.C. 1965. *Os Solos de Portugal. Sua classificação, caracterização e génese. I - A sul do rio Tejo*. Direcção-Geral dos Serviços Agrícolas. Secretaria de Estado da Agricultura. Lisboa.
- Ekern, P.C. 1953. Problems of raindrop impact erosion. *Agric. Eng.* 34: 23-25, 28.

- Ellison, W.D. 1947a. Soil erosion studies - Part I. *Agric. Eng.* 28: 145-147.
- Ellison, W.D. 1947b. Soil erosion studies - Part II. Soil detachment hazard by raindrop splash. *Agric. Eng.* 28: 197-201.
- Ellison, W.D. 1947c. Soil erosion studies - Part III. Some effects on infiltration and surface runoff. *Agric. Eng.* 28: 245-248.
- Ellison, W.D. 1947d. Soil erosion studies - Part IV. Soil erosion, soil loss, and some effects of soil erosion. *Agric. Eng.* 28: 297-300.
- Ellison, W.D. 1947e. Soil erosion studies - Part V. Soil transportation in the splash process. *Agric. Eng.* 28: 349-351, 353.
- Engel, O.G. 1966. Crater depth in fluid impacts. *J. of Appl. Physics* 34 (4): 1798-1808.
- Engel, O.G. 1967. Initial pressure, initial flow velocity and the time dependence of crater depth in fluid impacts. *J. of Appl. Physics* 38: 3935-40.
- Epema, G.F. & Riezebos, H.T. 1983. Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. In: De Ploey, J. (Ed.) *Rainfall simulation runoff and soil erosion*. Catena Supplement 4. Catena Verlag. Cremlingen-Destedt. 1-17.
- FAO, ISSS & ISRIC. 1998. *World Reference Base for Soil Resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. World Soil Resources Report Nº84. Roma.
- Ferreira, A.G.; Larock, B.E. & Singer, M.J. 1985. Computer simulation of water drop impact in a 9.6 mm deep pool. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 49 (6): 1502-1507.
- Ferreira, A.G. & Singer, M.J. 1985. Energy dissipation for water drop impact into shallow pools. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 49 (6): 1537-1542.
- Fukada, M.; Fujiwara, T. & Kusaka, T. 1992a. On a model of soil detachment by waterdrop impact on the water's surface based on a concept of pressure impulse - Fundamental studies on the mechanism of soil erosion by raindrop impact (III). *Trans. of the Japanese Soc. of Irrig.n Drain. and Reclam. Eng.*, 158: 17-28, (resumo em inglês).
- Fukada, M.; Fujiwara, T. & Kusaka, T. 1992b. Measurement of detached soil particles by applying positive pressure impulse produced by the impact of waterdrop on the surface of the water - Fundamental studies on the mechanism of raindrop erosion. *Trans. of the Japanese Soc. of Irrig., Drain. and Reclam. Eng.*, No.159: 37-43, (resumo em inglês).
- Ghadiri, H. & Payne, D. 1980. A study of soil splash using cine-photography. In: De Boodt, M.; Gabriels, D. (Eds.) *Assessment of erosion*. John Wiley & Sons. 185-192.
- Ghadiri, H. & Payne, D. 1986. The risk of leaving the soil surface unprotected against falling rain. *Soil and Tillage Research*, 8: 119-130.

- Gilley, J.E.; Woolhiser, D.A. & McWhorter, D.B. 1985. Interrill soil erosion - Part I: Development of model equations. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 28 (1): 147-153, 159.
- Green, T. & Houk, D. 1980. The resuspension of underwater-sediment by rain. *Sedimentology*, 27: 607-610.
- Hairsine, P.B. 1988. *A physically based model of the erosion of cohesive soils*. Ph. D. thesis. Griffith University.
- Hairsine, P.B. & Rose, C.W. 1991. Rainfall detachment and deposition: sediment transport in the absence of flow-driven processes. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 55: 320-324.
- Kinnell, P.I.A. 1988. The influence of flow discharge on sediment concentrations in raindrop induced flow transport. *Aust. J. of Soil Res.* 26: 575-582.
- Kinnell, P.I.A. 1990a. Modelling erosion by rain-impacted flow. *Catena-Suppl. No. 17*: 55-66.
- Kinnell, P.I.A. 1990b. The mechanics of raindrop-induced flow transport. *Aust. J. of Soil Res.* 28 (4): 497-516.
- Kinnell, P.I.A. 1991. The effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. *Trans. of Amer. Soc. of Agric. Eng.* 34 (1): 161-168.
- Macklin, W.C. & Metaxas, J.G. 1976. Splashing of drops on liquid layers. *J. of Appl. Physics*, 47 (9): 3963-3970.
- Mazurak, A.P. & Mosher, P.N. 1968. Detachment of soil particles in simulated rainfall. *Soil Science Society of America Proceedings*, 32: 798-800.
- Mazurak, A.P. & Mosher, P.N. 1970. Detachment of soil aggregates by simulated rainfall. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34: 798-800.
- Morgan, R.P.C. 1994. The European Soil Erosion Model: An update on its structure and research base. In: Rickson, R.J. (Ed.) *Conserving soil resources: european perspectives*. First International Congress of the European Soc. for Soil Conservation. pp. 286-299.
- Moss, A.J. 1988. Effects of flow-velocity variation on rain-driven transportation and the role of rain impact in the movement of solids. *Aust. J. of Soil Res.* 26: 443-450.
- Moss, A.J. & Green, P. 1983. Movement of solids in air and water by raindrop impacts: effects of drop-size and water-depth variations. *Aust. J. of Soil Res.* 21 (3): 257-269.
- Munn, J. 1976. Tahoe Lake rainfall simulator. University of California. Davies.
- Mutchler, C.K. & Hansen, L.M. 1970. Splash of a waterdrop at terminal velocity. *Science*, 169: 1311-12.

- Nearing, M.A.; Lane, L.J.; Alberts, E.E. & Laflen, J.M. 1990. Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 54: 1702-1711.
- Palmer, R.S. 1964. The influence of a thin water layer on waterdrop impact forces. *Intern. Assoc. Scientific Hydrology Publ.* No. 65: 141-148.
- Park, S.W.; Mitchell, J.K. & Bubenzer, G.D. 1982. Splash erosion modeling: physical analyses. *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.* 25: 357-361.
- Poesen, J. & Savat, J. 1981. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part II: detachability and transportability measurements. *Catena* 8: 19-41.
- Proffitt, A.P.B.; Rose, C.W. & Lovell, C.J. 1989. A comparison between modified splash-cup and flume techniques in differentiating between soil loss and detachability as a result of rainfall detachment and deposition. *Aust. J. of Soil Res.* 27 (4): 759-777.
- Rose, C.W. 1960. Soil detachment caused by rainfall. *Soil Science* 89 (1): 28-35.
- Rose, C.W. 1961. Rainfall and soil structure. *Soil Science* 90: 49-54.
- Schultz, J.P.; Jarrett, J.R. & Hoover, J.R. 1985. Detachment and splash of a cohesive soil by rainfall. *Transactions of Amer. Soc. of Agric. Eng.* 28 (6): 1878-1884.
- Sutherland, R.A.; Wan, Y.; Ziegler, A.D.; Lee, C.T. & El Swaify, S.A. 1996. Splash and wash dynamics: An experimental investigation using an Oxisol. *Geoderma* 69 (1-2): 85-103.
- Tuong, T.P. & Painter, D.J. 1974. The interaction between a raindrop and a shallow body of water. *Fifth Australasian Conf. on Hydraulics and Fluid Mech.* Christchurch, New Zealand pp. 96-102.
- Woodburn, R. 1948. The effect of structural condition on soil detachment by raindrop action. *Agric. Eng.* 29: 154-156.