

“DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÕES DA INFILTRABILIDADE DE UM SOLO MEDITERRÂNICO PARA O DIMENSIONAMENTO E GESTÃO DA REGA COM RAMPAS ROTATIVAS”

Luís L. SILVA

Prof. Auxiliar, Dep. Engº Rural, Univ. Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora, l.silva@uevora.pt

Ricardo P. SERRALHEIRO

Prof. Catedrático, Dep. Engº Rural, Univ. Évora, Apartado 94, 7002-554 Évora, ricardo@uevora.pt

RESUMO

Uma realização de regas de boa qualidade exige que o sistema de rega utilizado aplique a água com uma intensidade compatível com as características de infiltração do solo. Para se conseguir determinar esta compatibilidade é necessário conhecer as características de infiltração do solo, nomeadamente a sua infiltrabilidade.

De um modo geral a infiltração de um solo tem sido avaliada com recurso a infiltrómetros, utilizados em ensaios de campo. Porém, no caso de sistemas como as rampas rotativas, que apresentam elevadas taxas de aplicação da água é mais difícil reproduzir essas mesmas taxas em pequenos infiltrómetros, o que origina equações que subestimam a capacidade de infiltração do solo.

O objectivo do trabalho apresentado foi o de determinar equações da infiltrabilidade de um solo Mediterrânico utilizando o próprio sistema de rega como mecanismo de aplicação da água. Em dois anos, simularam-se as condições de funcionamento da parte terminal de rampas rotativas com aproximadamente 200 e 400 m de comprimento e aspersores com baixa pressão (140 kPa). Isto permitiu realizar ensaios de infiltração com diferentes intensidades pluviométricas e diferentes condições superficiais do solo (teor de água, compactação superficial) permitindo deste modo obter equações em diferentes situações hidropedológicas.

Verificou-se que a infiltrabilidade do solo diminui bastante com o aumento do teor de água na camada superficial, mas também com a maior compactação e formação de crosta superficial do solo. Situação que é facilitada com a utilização de aspersores com deflectores estriados, que aplicam a água com gotas de maior diâmetro.

As equações obtidas em ensaios com o solo seco, mas já sujeito a aplicações de água anteriores, apresentam valores idênticos a situações com maior teor de água no solo e sendo esta a condição mais provável do solo, antecedendo uma rega, leva a considerar que a equação obtida nestas condições será a mais fiável para utilizar no dimensionamento e gestão da rega.

O aumento da intensidade pluviométrica da máquina provoca um aumento dos valores determinados para a infiltrabilidade do solo para tempos até aos 25-30 min., comprovando que a intensidade de aplicação da água é um factor importante a ter em conta neste processo.

Experimentado o ajustamento dos dados de campo a diferentes equações tipo da infiltrabilidade, verificou-se que a equação do tipo Kostiakov é aquela que apresenta melhores resultados.

Palavras chave: Rampas rotativas, solos Mediterrâneos, equações da infiltração, infiltrabilidade.

1. INTRODUÇÃO

As características de infiltração do solo são um parâmetro de extrema importância para o dimensionamento e gestão de qualquer sistema de rega. A escolha do método de rega mais adequado a um determinado solo e cultura, a escolha dos equipamentos a utilizar em cada caso, ou o modo como a rega terá que ser gerida de modo a adaptar o sistema de rega ao solo, para obter regas com boa eficiência e uniformidade está muito dependente do conhecimento das características do processo de infiltração de cada solo.

A tentativa de compatibilizar as características de aplicação da água pelo sistema com as características de infiltração do solo, tem como objectivo minimizar as perdas de água por escorramento (aumentando a eficiência do sistema) e a consequente erosão daí resultante.

A bibliografia mais recente da especialidade continua a apresentar metodologias de cálculo do escorramento potencial baseadas em equações da infiltração obtidas com infiltrómetros de duplo anel, depois modificadas para se aproximarem às condições da rega por aspersão (Kincaid *et al.*, 1969; Chu, 1987) ou equações obtidas com infiltrómetros de aspersão (Keller & Bliesner, 1990). Verifica-se no entanto, que quer num caso quer noutra as características de aplicação da água não são de modo algum semelhantes às características de aplicação da água por sistemas de rega por aspersão como as rampas rotativas. No primeiro caso porque os ensaios com infiltrómetros de duplo anel são realizados em condições de saturação superficial, o que na rega por aspersão se tenta evitar, já que é essa situação que pode levar ao escorramento. No segundo caso porque os infiltrómetros de aspersão dificilmente conseguem reproduzir as taxas de aplicação das rampas rotativas, principalmente daquelas que funcionam com baixa pressão.

De salientar também que a capacidade de infiltração do solo pode ser afectada por vários factores, quer do próprio solo (textura, estrutura, formação de crosta superficial, teor de água), quer do modo como a água é aplicada (taxa de aplicação, energia cinética das gotas de água), quer ainda do tipo de mobilização a que o solo está sujeito.

No caso das rampas rotativas, talvez o sistema de rega por aspersão com mais expansão em Portugal, a utilização de sistemas que funcionam com baixa pressão tem agravado o problema do escorramento e erosão provocado por estes sistemas. Em trabalhos apresentados por Undersander *et al.* (1985) ou DeBoer *et al.*, (1992) foi possível verificar uma diminuição da infiltração e aumento de escorramento com a diminuição da pressão de funcionamento dos aspersores. Os menores valores de pressão dos sistemas de baixa pressão fazem com que o alcance das gotas de água seja menor, o que implica uma aplicação da mesma quantidade de água numa área mais reduzida, ou seja, uma intensidade de aplicação maior.

Esta diminuição da infiltração é também devida a um efeito indirecto da pressão de funcionamento e do tipo de aspersor que é a formação de crosta superficial no solo pelo impacto das gotas de água. Diferentes pressões de funcionamento, e aspersores, originam gotas de diferentes tamanhos, aplicadas com intensidades diferentes, cuja energia cinética pode causar maior ou menor compactação superficial do solo, causando alterações na sua infiltrabilidade. Esta redução da infiltração, devido ao efeito da crosta superficial, tem sido observada ao longo dos anos por diversos autores (Moore, 1981; Morin *et al.*, 1981; Mohammed & Kohl, 1987; Bradford *et al.*, 1987; Basahi *et al.*, 1998), em diferentes condições e tipos de solos. A partir do momento em que o solo apresenta uma camada superficial compacta a infiltração em eventos sequentes torna-se mais reduzida, em grande parte devido à redução da condutividade hidráulica superficial que ocorre com a formação de crosta (Morin *et al.*, 1981; Bosch & Onstad, 1988).

O objectivo do trabalho apresentado foi o de determinar equações da infiltrabilidade de um solo Mediterrâneo sujeito a aplicações de água com diferentes tipos de aspersores e intensidades máximas, e com diferentes condições de humidade do solo e compactação superficial, comparando os resultados obtidos de modo a poder seleccionar a equação mais adequada para efeitos de dimensionamento dos

sistemas. Como objectivo secundário analisou-se o ajustamento dos dados de campo a diferentes equações tipo utilizadas para representar a capacidade de infiltração do solo de modo a determinar a mais adequada à rega com rampas rotativas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Características do solo

Os ensaios de infiltração foram realizados, em dois anos consecutivos, num solo Mediterrâneo Pardo Normal de xistas anfibólicos, cujas principais características hidropedológicas podem ser observadas no quadro 1.

Quadro 1 – Dados físicos e químicos do solo, e retenção da água no solo

Horiz.	Espessura (cm)	Areia (%)	Limo (%)	Argila (%)	Classe Textural	<i>Dap</i>	Teor de água no solo (% vol)			M.O. (%)
							CC	CE	CU	
A	0 - 40	54,1	13,4	32,5	Franco-Arg-Arenosa	1,42	23,6	13,7	9,9	1,33
B	40 - 67	43,3	15,2	41,5	Franco-Arg a Argilosa	1,49	24,9	19,7	5,2	0,48
C	67 - ...	66,1	9,6	24,3	Franco-Arg-Arenosa	1,62	19,4	11,9	7,5	0,25

O solo foi sujeito a uma gradagem, com uma grade de discos, a uma profundidade de cerca de 20 cm, e depois, 3 ou 4 dias antes de cada série de ensaios, foi ainda realizada uma escarificação até 10-15 cm de profundidade, utilizando um escarificador ao qual foi acoplado um rojão, com o objectivo de deixar a superfície do solo o mais regular possível. Como se pode verificar todas estas mobilizações ocorrem ao nível do primeiro horizonte do solo, não havendo por isso mistura de horizontes.

Após estas mobilizações a superfície do solo ficou em condições idênticas às que ocorrem normalmente numa situação real de rega. A alteração da infiltração e a ocorrência de escorrimento será mais evidente quando o solo se encontra desprotegido, sem vegetação, e está assim mais exposto à acção da água aplicada. Esta situação ocorre normalmente quando a planta pelo seu pequeno porte deixa grandes áreas de terreno sem cobertura, que recebem directamente a água aplicada; ou na situação de regas com uma frequência elevada, em que muitas vezes a água é aplicada quando o solo apresenta teores de água na camada superficial demasiado elevados para permitir uma boa infiltração.

2.2. Características de aplicação da água

Para a realização dos ensaios de campo utilizou-se uma rampa rotativa experimental, composta por duas torres que suportam dois lanços com 12 m de comprimento, cada um, e um lanço suspenso de 6 m, num comprimento total de 30 m. No entanto, as condições de funcionamento da rampa rotativa foram modificadas de modo a ser possível simular a parte final de um sistema de maiores dimensões, funcionando com baixa pressão.

O aspersor escolhido foi o mais comum nas rampas rotativas de baixa pressão, ou seja, um aspersor estático. Nestes aspersores foram utilizados dois tipos de pratos deflectores diferentes (fig. 1), o que foi suficiente para originar dois aspersores com características de funcionamento e padrões de distribuição da água também diferentes, permitindo assim estudar a influência do tipo de aspersor sobre as características da infiltração. Os aspersores, cuja distância ao solo era de 3,9 m, estavam equipados com um regulador de pressão, garantindo uma pressão de funcionamento máxima de 140 kPa.



Figura 1 – Aspersores estáticos de baixa pressão com dois tipos de pratos deflectores:
A – lisos e B – estriados.

No primeiro ano de ensaios os aspersores tinham um espaçamento de 3 m, num total de 9 aspersores ao longo de toda a rampa rotativa, e com diâmetros dos bicos entre 2,75 e 6,0 mm. No segundo ano aumentou-se o número de aspersores reduzindo o espaçamento entre aspersores para 1,5 m, mantendo-se o mesmo intervalo de diâmetros dos bicos. As condições de funcionamento do sistema são as apresentadas no quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros de funcionamento da rampa rotativa

Ano de ensaio	Caudal (m ³ /h)	Pressão no pólo (kPa)	Espaçamento dos aspersores (m)	Intensidade pluviométrica máxima (mm/h)		Diâmetro molhado (m)	
				Aspersores c/ def. lisos	Aspersores c/ def. estriados	Aspersores c/ def. lisos	Aspersores c/ def. estriados
1º	9,03	230	3	63 - 68	53 - 63	10 - 12	14 - 16
2º	14,50	265	1,5	111 - 125	99 - 116	11 - 12,8	14 - 16

Os valores das intensidades pluviométricas máximas obtidas em cada ano serão aproximados aos aplicados na parte final de máquinas com, respectivamente, cerca de 200 e 400 m de comprimento, funcionando com esta pressão e tipo de aspersores.

2.3. Ensaios de infiltração

Os ensaios de infiltração foram realizados utilizando a metodologia proposta por Shockley (Serafim, 1994). Este método apresenta a particularidade de utilizar o próprio equipamento de rega para aplicar a água sobre o terreno, permitindo realizar o ensaio de infiltração em condições idênticas às da própria rega.

Antes de iniciar o ensaio, a rampa rotativa é immobilizada numa determinada posição do terreno e são colocados no solo, sob a rampa e perpendiculares a esta, recipientes (pluviômetros), espaçados 1 metro uns dos outros, até uma distância, para cada lado da rampa rotativa, igual ou superior ao alcance dos aspersores (fig. 2). Estes pluviômetros recolhem a quantidade de água que chega ao solo, durante o ensaio. Para obter mais dados foram colocadas 3 linhas de pluviômetros, que devido à sua proximidade podem ser consideradas repetições umas das outras.

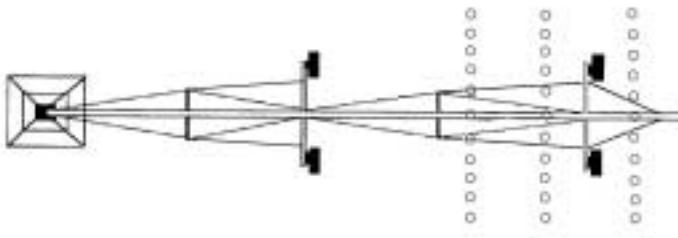


Figura 2 – Esquema da disposição dos pluviômetros nos ensaios de infiltração (Silva, 2001).

O ensaio inicia-se com a aplicação da água, pela rampa rotativa imobilizada, e termina em cada ponto do terreno no momento em que junto ao respectivo pluviômetro se verifica o empoçamento da água. Este momento, que representa a transição de uma taxa de infiltração da água no solo superior à taxa de aplicação (situação em que predomina a infiltração) para uma taxa de infiltração da água inferior à sua taxa de aplicação (início do armazenamento superficial e posterior escorramento), é atingido nos vários pontos em tempos diferentes, uma vez que a intensidade de aplicação vai variar com a distância a que o pluviômetro se situa da rampa rotativa.

No momento em que se verifica o empoçamento junto a um determinado pluviômetro, este é retirado do terreno e é então medido o volume de água recolhido. A divisão deste volume (que é igual ao volume infiltrado) pelo tempo que o originou corresponde ao valor da intensidade de aplicação da água nesse ponto, que se considera constante ao longo do tempo. Como, até esse momento, não se tinha verificado nem acumulação de água à superfície nem escorramento, isso indica que a água aplicada com uma determinada intensidade ou taxa se infiltrou a essa mesma taxa, que será a taxa de infiltração do solo.

Havendo uma série de pontos que recebem e infiltram água a diferentes taxas durante diferentes tempos, no fim de cada ensaio existe um conjunto de pontos, cada um deles constituído por um par de valores (taxa aplicação/infiltração, tempo) que por regressão matemática permitem a determinação de uma curva da infiltrabilidade do solo em função do tempo.

A regressão matemática, dos dados de campo, foi feita utilizando um processo numérico iterativo não-linear combinado com o método dos mínimos quadrados, tendo-se efectuado também uma análise estatística da significância do ajustamento das curvas obtidas, relativamente aos dados observados, através do teste F (Davis, 1986).

Os dados dos vários ensaios foram ajustados a diferentes equações tipo da infiltrabilidade, derivadas das soluções simplificadas da infiltração mais comuns (Silva, 2001):

$$Equação\ de\ Philip:\quad i = \frac{1}{2} S_1 t^{-1/2} + A_1 \quad (1)$$

em que:

i - infiltrabilidade do solo (LT^{-1});

t - tempo (T);

S_1 - parâmetro que Philip denominou "sorptivity" e Mello (1984) traduziu para português como *sorvidade* ($LT^{-3/2}$);

A_1 - parâmetro dependente do teor de água no solo (LT^{-1}).

Equação de Green-Ampt

$$i = a_2 \left(1 + \frac{b_2}{I} \right) \quad (2)$$

em que:

I - infiltração acumulada (L);

$b_2 = \Delta\theta h_f$, sendo h_f a pressão efectiva na frente de humedecimento e $\Delta\theta$ a variação do teor de água no solo.

a_2 - parâmetro de ajustamento, que substitui a condutividade hidráulica saturada (K_s).

Equação de Kostiakov

$$i = at^b \quad (3)$$

em que:

a e b - parâmetros de ajustamento.

Equação de Kostiakov-Lewis

$$i = at^b + i_f \quad (4)$$

em que:

a e b - parâmetros de ajustamento;

i_f - infiltrabilidade final ou estabilizada (LT^{-1}).

Equação de Horton

$$i = i_i + (i_i - i_f) e^{-c_1 t} \quad (5)$$

em que:

i_i - infiltrabilidade inicial (LT^{-1});

i_f - infiltrabilidade final (LT^{-1});

c_1 - parâmetro de ajustamento (T^{-1}).

Na prática, os valores de i_i e $(i_i - i_f)$, são substituídos por dois parâmetros de ajustamento, obtidos a partir dos dados dos ensaios de infiltração.

Este ajustamento dos dados a várias equações tipo teve como objectivo verificar se existia um melhor ajustamento a algum destes tipos de equações em particular. Na resolução da equação de Green-Ampt, considerou-se a condição de que, para uma taxa de aplicação/infiltração constante, o volume infiltrado será igual ao produto da taxa de infiltração pelo tempo ($I = i t$).

Após a realização das várias regressões escolheu-se uma equação representativa de cada ensaio, utilizando-se como critério de selecção a eliminação: i) das equações não significativas, ii) das equações determinadas com base em valores de intensidade de aplicação com intervalo pequeno e iii) de coeficientes de determinação (r^2) pequenos. Em caso de ainda ser necessário escolhia-se a equação que apresentava valores de infiltrabilidade intermédios relativamente às outras.

2.3.1. Sequência dos ensaios de infiltração

No primeiro ano realizou-se um primeiro ensaio com o solo seco e recém mobilizado (situação correspondente a uma primeira rega), um segundo ensaio numa situação de solo com um teor de água elevado (2 dias depois do 1º ensaio) e finalmente um terceiro ensaio depois do solo estar 4 ou 5 dias sem receber água, de modo a permitir a diminuição do seu teor de água e o endurecimento da camada superficial, com formação ou não de crosta superficial. No segundo ano realizou-se ainda um quarto ensaio, 48 horas depois do terceiro, ou seja, novamente com um teor de água elevado.

Esta sequência de ensaios foi feita em separado para as duas configurações de aspersor/deflector utilizadas.

No total realizaram-se 6 ensaios no primeiro ano e 8 no segundo, recolhendo-se em cada um deles dados para a determinação de 3 equações da infiltrabilidade.

2.4. Avaliação dos factores que influenciam a infiltrabilidade

Dada a diversidade de factores que, directa ou indirectamente, influenciam a infiltrabilidade do solo, foi necessário avaliar os mais importantes, para ser possível verificar qual ou quais influenciam mais a infiltrabilidade do solo.

2.4.1. Energia cinética da precipitação

Conforme já foi referido um dos parâmetros que pode influenciar a formação de crosta superficial, e consequentemente alterar a infiltrabilidade do solo, é o impacto na superfície do solo das gotas de água aplicadas e que são providas de uma determinada energia cinética.

Para estimar este parâmetro recorreu-se a uma versão do programa DRIFT, gentilmente cedida pelo seu autor, o Dr. Dennis Kincaid. O programa (Kincaid, 1996) calcula a energia cinética total por unidade de massa de um determinado padrão de distribuição, em função das velocidades de impacto das gotas de diferentes tamanhos:

$$Ec_T = \frac{\sum_{j=1}^n p_j (v_{ig})_j^2}{2} \quad (6)$$

em que:

Ec_T - energia cinética total por unidade de massa, (J/kg);

p_j - percentagem de gotas com um diâmetro correspondente ao intervalo j;

v_{ig} - velocidade de impacto das gotas de água no solo (m/s);

n - nº total de intervalos de diâmetros de gotas.

A distribuição dos tamanhos de gotas e o seu diâmetro médio foram estimados de acordo com a metodologia apresentada por Kincaid *et al.*(1996), obtendo-se valores para os diâmetros médios das gotas aplicadas pelos aspersores com deflectores estriados e lisos, de 1,28 e 1,18 mm, respectivamente.

A velocidade de impacto das gotas é calculada pelo programa DRIFT, através da resolução matemática das equações (7) e (8), determinadas com base na teoria da balística aplicada a uma gota de água (Silva, 2001):

$$-\frac{3}{4} C_D \rho_{ar} v_r^2 = \rho_g d \frac{dv_x}{dt} \quad (7)$$

$$g d (\rho_g - \rho_{ar}) - \frac{3}{4} C_D \rho_{ar} v_r^2 = d \rho_g \frac{dv_z}{dt} \quad (8)$$

em que:

C_D – coeficiente de arrastamento de uma gota (adimensional);

ρ_{ar} – massa volúmica do ar (kg/m^3);

ρ_g - massa volúmica da gota (kg/m^3);

v_r – velocidade da gota relativa ao ar (m/s);

v – velocidade da gota (m/s)

d - diâmetro da gota (m)

\bar{g} - aceleração da gravidade (m/s^2);

x e z - indicam respectivamente a componente horizontal e vertical da velocidade.

2.4.2. Velocidade do vento

A ocorrência de vento com velocidades elevadas pode afectar a realização dos ensaios de infiltração, pois desvia a água aplicada num ponto para outros, modificando a taxa de aplicação da água sobre cada ponto do terreno. Ao mesmo tempo, vai provocar um aumento da velocidade das gotas de água, alterando a sua energia cinética. Antes de cada ensaio a velocidade do vento foi medida utilizando um anemómetro portátil, o que permitiu iniciar todos os ensaios na ausência de vento, ou com velocidades inferiores a 0,1 m/s. Apesar de isso, durante alguns ensaios verificou-se alterações na velocidade do vento, que foram registadas.

2.4.3. Teor de água no solo

Outro parâmetro que pode afectar a capacidade de infiltração do solo é o seu teor de água. O seu valor foi medido antes de cada ensaio, nos primeiros centímetros do solo com uma sonda *Theta probe ML2* e em profundidade, com intervalos de 10 cm, utilizando uma sonda *capacitiva* com tubos de acesso até aos 60-70 cm de profundidade. Ambas as sondas permitem obter o teor de água no solo através do método da capacidade (Paltineau & Starr, 1997), que se baseia na resposta às variações da constante dieléctrica do solo. As sondas foram calibradas para o solo em estudo e foram feitas três medições ao longo de cada posição onde se colocou uma linha de pluviômetros.

2.4.4. Formação de crosta superficial

Como já foi referido anteriormente o impacto no solo de gotas de água pode provocar a sua compactação superficial, possibilitando a formação de uma crosta, que irá influenciar a condutividade hidráulica do solo, e consequentemente a sua infiltrabilidade.

A avaliação do aumento da compactação superficial ao longo dos ensaios foi feita através da determinação da densidade aparente do solo, com base em amostras não perturbadas, recolhidas nos primeiros centímetros de solo antes de cada ensaio de infiltração. No primeiro ano utilizaram-se anéis metálicos com 5 cm de altura e um volume de 100 cm³, tendo-se recolhido três amostras junto a cada linha de pluviômetros. Após os ensaios do primeiro ano verificou-se que a variação da densidade aparente não era muito notória, pelo que no segundo ano foram utilizados anéis com uma altura apenas de 1,5 cm, tentando recolher apenas a camada de solo mais afectada pela eventual compactação devida ao impacto das gotas de água.

Para medir a espessura da crosta superficial, eventualmente formada, foram recolhidas antes de cada rega algumas amostras de solo, utilizando uma espátula, o que permitiu nalguns casos efectuar a referida medição.

2.4.5. Condutividade hidráulica superficial

A condutividade hidráulica da camada superficial do solo foi medida utilizando um permeâmetro de disco (Perroux & White, 1988), também denominado infiltrómetro de tensão (Hussen & Warwick, 1995) e o método de tensões múltiplas apresentado por Hussen & Warwick (1995). Devido a dificuldades com o equipamento este parâmetro apenas foi medido no segundo ano de ensaios.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os diferentes dados foram tratados estatisticamente através de análises de variância e do teste LSD (Statsoft, 1995), o que permitiu verificar se as diferenças encontradas eram ou não significativas.

3.1. Escolha da equação tipo para representar a infiltrabilidade do solo

Os dados recolhidos nos ensaios de infiltração foram ajustados às diferentes equações tipo da infiltrabilidade e esse ajustamento foi analisado estatisticamente. De entre as equações tipo escolhidas para a realização desta análise, apenas para as equações do tipo Kostiakov, Green-Ampt e Philip foi possível encontrar constantes de ajustamento para os valores de todos os ensaios.

As equações do tipo Kostiakov-Lewis e Horton, além de apresentarem o inconveniente de nem sempre se conseguirem encontrar constantes de ajustamento aos dados de campo, também apresentam alguns casos valores negativos para o parâmetro de ajustamento correspondente à infiltrabilidade final ou estabilizada. A equação do tipo Kostiakov-Lewis foi a que mostrou piores resultados de ajustamento, obtendo-se algumas vezes valores inferiores a -1 para o parâmetro de ajustamento correspondente ao expoente do tempo. Isto significaria valores negativos do expoente do tempo da equação da infiltração acumulada, o que não é possível.

A obtenção destes valores, sem consistência física, para parâmetros destes dois tipos de equações deve-se à dificuldade ou mesmo impossibilidade de determinar um valor correcto da infiltrabilidade final, requerida por estas equações. Esta situação, que é frequente nos solos Argiluvíadios (Serralheiro, 1988), acontece aqui com mais razão uma vez que a aplicação da água é feita num tempo reduzido, parando quando se iniciam as condições de saturação superficial, o que impossibilita a obtenção de uma infiltrabilidade final ou estabilizada.

Das equações que permitiram sempre a obtenção de parâmetros de ajustamento foi a de Green-Ampt que apresentou melhores valores quer do coeficiente de determinação (r^2), quer do número de equações estatisticamente muito significativas ($p<0,01$). No entanto, verifica-se que esta equação apresenta algumas vezes valores muito pequenos para o segundo parâmetro de ajustamento, o que se traduziria numa infiltrabilidade do solo praticamente constante ao longo do tempo, situação que não corresponde à realidade.

Tal como nas equações anteriores, aos parâmetros de ajustamento encontrados para esta equação falta consistência física. A curta duração dos ensaios não permite que se atinjam condições necessárias para a determinação da condutividade hidráulica saturada, representada pelo primeiro parâmetro de ajustamento, verificando-se que, em muitos casos, quer este quer o segundo parâmetro de ajustamento (que está relacionado com a diferença de teor de água do solo antes e depois do ensaio) apresentam valores que dificilmente poderiam corresponder a uma situação real.

Das outras duas equações é a de Kostiakov que, no conjunto dos dois anos, apresenta melhores resultados médios de ajustamento, muito próximos dos da equação de Green-Ampt, tendo por isso sido a equação tipo escolhida para representar a infiltrabilidade. De salientar que, devido à reduzida duração destes ensaios, o inconveniente apontado a esta equação, de os valores da infiltrabilidade tenderem para zero à medida que o tempo tende para infinito, pode ser aqui desprezado.

Serralheiro (1988) ao fazer uma análise deste género, utilizando dados de campo obtidos em ensaios com um infiltrómetro de sulco com retorno num solo Mediterrâneo, também tinha conseguido melhores resultados para a equação do tipo Kostiakov. Uma das possíveis razões para este facto será a maior elasticidade que esta equação, do tipo potência, apresenta no processo de optimização matemática para diferentes conjuntos de dados, relativamente às outras, algo mais complexas, e portanto com mais restrições matemáticas.

3.2. A evolução da infiltrabilidade e o efeito dos diferentes factores

As equações da infiltrabilidade apresentadas foram escolhidas em cada ensaio de acordo com os critérios apresentados no ponto 2.3., e expressam o valor da infiltrabilidade em mm/h, com os valores do tempo em horas. Todas elas são estatisticamente significativas ($p<0,05$), sendo a grande maioria muito significativas ($p<0,01$).

3.2.1. Resultados do primeiro ano de ensaios

Na figura 3 são apresentadas as equações escolhidas em cada ensaio e que dizem respeito às diferentes condições do solo antes do ensaio: solo seco (recém mobilizado – 1º ensaio), solo húmido (2º ensaio) e solo seco com alguma compactação superficial provocada pela energia cinética das precipitações dos ensaios anteriores (3º ensaio). Junto à identificação da condição de solo antecedente ao ensaio é apresentado também o respectivo teor de água na camada superficial.

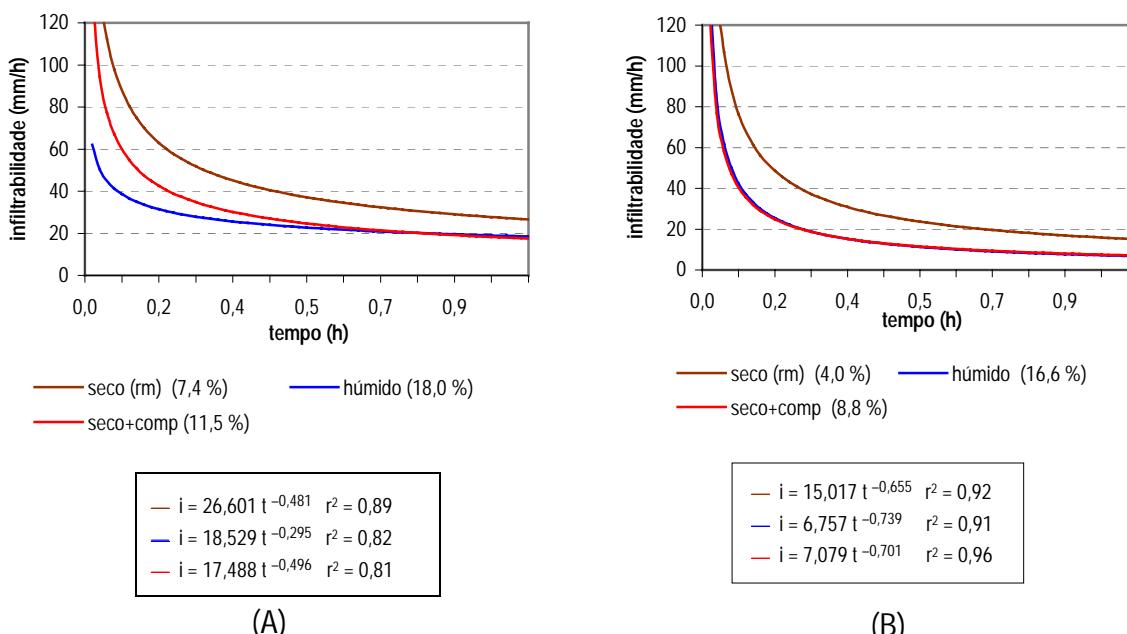


Figura 3 – Equações da infiltrabilidade no primeiro ano de ensaios, utilizando deflectores lisos (A) e estriados (B).

Da observação das figuras anteriores pode-se verificar uma diferença grande da infiltrabilidade do solo seco e recém mobilizado (1º ensaio) relativamente à infiltrabilidade dos ensaios com o solo húmido (2º ensaio) e com o solo seco mas com alguma compactação superficial (3º ensaio).

Relativamente à infiltrabilidade com o solo húmido e seco com compactação observa-se, em geral, que esta apresenta valores muito próximos.

Como se observa na figura 3, existiu uma diferença acentuada entre o teor de água do solo na camada superficial que antecedeu os diferentes ensaios. Esta diferença existiu sempre nos primeiros 10 cm de solo, atenuando-se com a profundidade no perfil do solo. No entanto, como a duração dos ensaios foi relativamente curta, terminando com a saturação superficial, foi fundamentalmente o teor de água na camada superficial que influenciou os resultados dos ensaios de infiltração.

Se é fácil de explicar a redução na infiltrabilidade entre o 1º e o 2º ensaios de cada série, devido ao efeito de um maior teor de água no 2º ensaio, o mesmo já não acontece entre o 2º e o 3º, onde existiu uma diminuição do teor de água superficial e a infiltrabilidade do solo manteve valores

semelhantes. Isto só pode ser explicado pela existência de alguma compactação superficial ou formação de crosta que tenha influenciado a infiltração da água no último ensaio.

A possível compactação superficial foi avaliada através da determinação da densidade aparente do solo antes dos diferentes ensaios. Observou-se, em geral, um aumento da densidade aparente da camada superficial do solo a partir do 1º ensaio, devido à compactação da camada superficial provocada pelo impacto das gotas de água, variando os valores entre 1,21 e 1,32. Apesar disso, a análise estatística dos dados revela que não existem diferenças significativas ($p>0,05$) entre os valores obtidos antes dos diferentes ensaios realizados com cada tipo de aspersor. O facto das amostras para determinação da densidade aparente do solo terem sido recolhidas, neste ano, com a utilização de anéis metálicos com uma altura de 5 cm, colocou a hipótese de não existirem diferenças significativas por se terem recolhido amostras numa espessura de solo muito grande. Com as intensidades de aplicação da máquina verificadas e a pequena duração destes ensaios, não será de prever uma compactação do solo muito grande, pelo que a recolha de amostras até uma profundidade de 5 cm irá certamente mascarar esse efeito.

Também não foi possível verificar indícios da formação de uma crosta superficial com espessura visível a olho nú, o que não significa que ela não exista. Alguns autores como McIntyre (1958), referem, como resultado dos seus trabalhos, a observação de uma película de solo mais compacta, com uma espessura da ordem dos 0,1 mm, impossível de observar a olho nú, mas cujo efeito sobre a redução da infiltrabilidade do solo era evidente.

Ainda observando a figura 3, é possível verificar que as equações da infiltrabilidade obtidas com os aspersores equipados com deflectores estriados apresentam valores ligeiramente inferiores, o que indica que o tipo de deflector utilizado no aspersor terá algum efeito na redução da infiltrabilidade do solo. Apesar desta diferença não ser significativa, a sua explicação residirá no facto destes aspersores aplicarem a água com gotas de maior diâmetro, o que conduzirá a maiores energias de impacto, maior compactação superficial e consequentemente maior redução da infiltrabilidade do solo.

A energia cinética por unidade de massa das gotas de água aplicadas pelos dois tipos de aspersores durante os ensaios variou entre 11,4 e 15,7 (J/kg) (com velocidades do vento de 0,3 a 3,0 m/s) e 12,3 a 12,6 (J/kg) (com velocidades do vento de 0,1 a 0,5 m/s), respectivamente na utilização de deflectores lisos e estriados. Mesmo não sendo uma diferença muito grande, é evidente o aumento da energia cinética das gotas nos ensaios em que se utilizaram aspersores com deflectores estriados, para valores da velocidade do vento semelhantes. Quando a velocidade do vento é elevada, o seu efeito sobre a energia cinética aplicada é mais importante do que o tipo de aspersor utilizado.

Após a análise dos resultados verifica-se que para estes valores de intensidade pluviométrica a influência do tipo de aspersor utilizado na redução da infiltrabilidade do solo não é significativa.

3.2.2. Resultados do segundo ano de ensaios

Tal como no primeiro ano, foi evidente uma maior infiltrabilidade do solo obtida no 1º ensaio relativamente a todos os outros, que apresentam valores muito idênticos.

Comparando os gráficos da figura 4 com os da figura 3, é visível o aumento dos valores da infiltrabilidade obtidos no 2º ano, principalmente para tempos curtos e nos ensaios com o solo recém mobilizado. Enquanto não excederem a capacidade de infiltração do solo, taxas de aplicação da água mais elevadas irão proporcionar a chegada de mais água ao solo originando maior quantidade de água infiltrada por unidade de tempo, ou seja maiores taxa de infiltração. Como as equações da infiltrabilidade foram determinadas com base nestes valores, também elas irão apresentar valores mais elevados.

Este efeito do aumento da taxa de infiltração com o aumento da taxa de aplicação já foi observado por outros autores. Chu *et al.* (1987), em testes de infiltração realizados num solo nô

mobilizado, encontraram um aumento de 100 % na taxa de infiltração do solo fazendo variar a taxa de aplicação de 25 para 125 mm/h.

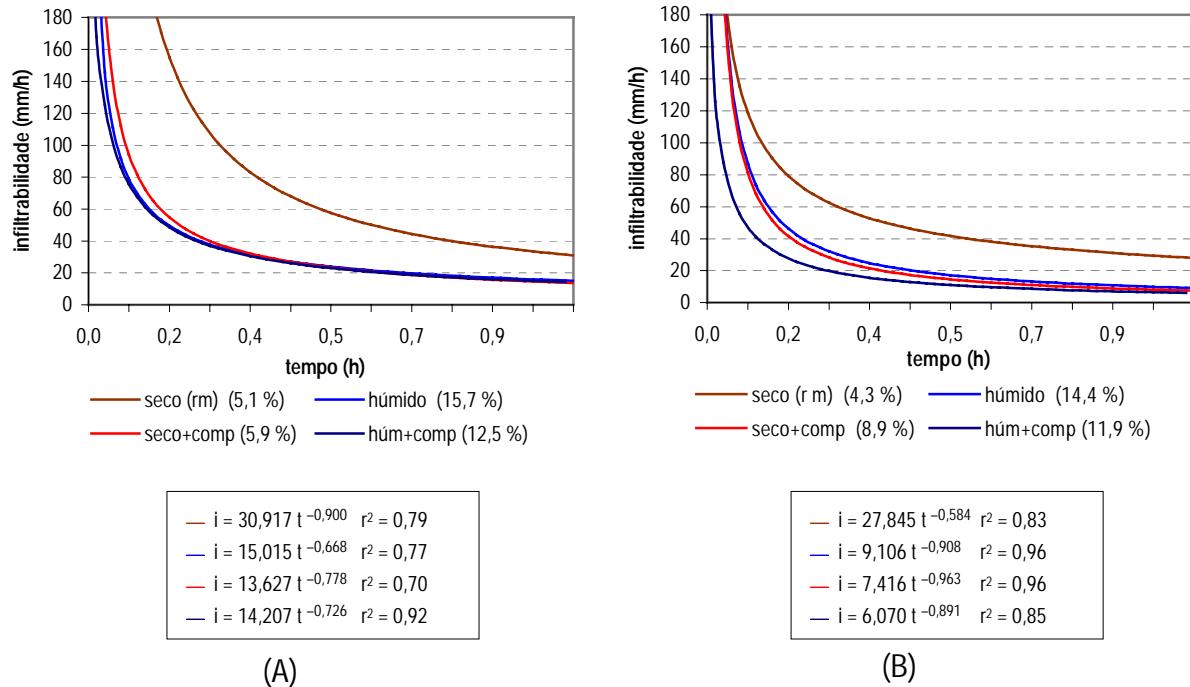


Figura 4 – Equações da infiltrabilidade no segundo ano de ensaios, utilizando deflectores lisos (A) e estriados (B).

O teor de água do solo poderia ter tido alguma influência sobre este aumento da infiltrabilidade, mas a proximidade de valores para a mesma condição de solo antecedente ao ensaio, de um ano para o outro, na maioria dos casos indica que outros factores, nomeadamente a taxa de aplicação da água, terão contribuído mais para esta diferença. Voltou-se também a verificar, como no primeiro ano, diferenças no teor de água do solo fundamentalmente nos primeiros 10 cm, mantendo-se depois no resto do perfil um valor muito idêntico ao longo dos ensaios.

A semelhança entre as curvas da infiltrabilidade obtidas com diferentes teores de água na camada superficial, volta a colocar a questão do efeito da energia cinética da precipitação sobre a redução da infiltrabilidade do solo devido à compactação superficial.

A análise estatística dos valores da densidade aparente determinada revelou mais uma vez a inexistência de diferenças significativas ($p>0,05$) entre os valores obtidos, que variaram entre 1,15 e 1,23. No entanto, exceptuando os valores que antecederam o primeiro ensaio com a utilização de deflectores estriados, nota-se uma tendência para o aumento da densidade aparente ao longo das sucessivas aplicações. De referir ainda que, estes valores de densidade aparente não são comparáveis com os obtidos no 1º ano, uma vez que se referem apenas à camada superficial até 1 cm de profundidade e não 5 cm como aconteceu no ano anterior.

Apesar de não existirem diferenças significativas na densidade aparente do solo, nestes ensaios já foi possível identificar uma camada superficial mais compacta, à qual se poderia chamar crosta, algumas zonas do terreno, após a realização do 2º ensaio de infiltração com os aspersores com deflectores estriados. Esta camada superficial mais compacta ou crosta, apresentava antes do 3º ensaio de infiltração uma espessura de cerca de 0,5 cm e uma consistência muito ligeira, quebrando-se facilmente; antes do 4º ensaio a sua espessura era um pouco superior, chegando a valores de cerca de 1 cm, já com maior consistência.

Esta crosta superficial teve um efeito significativo na redução da infiltrabilidade do solo que se verificou no último ensaio com os aspersores com deflectores estriados (fig. 4-B) e que não tinha acontecido nos ensaios com deflectores lisos.

A camada compacta ou crosta foi mais evidente nos ensaios com os aspersores com deflectores estriados pelo facto destes aspersores originarem gotas maiores e por isso também com maior energia de impacto. A energia cinética calculada variou entre 11,3 e 11,5 (J/kg) (com velocidades do vento entre 0,2 e 0,5 m/s) no caso dos deflectores lisos e entre 12,3 e 16,0 (J/kg) (com velocidades do vento entre 0,1 e 2,8 m/s) no caso dos deflectores estriados. Como os vários pontos do terreno receberam água com maior ou menor intensidade, a quantidade total de água aplicada foi diferente, influenciando o valor da energia cinética aplicada em cada ponto (J/m^2), o que resultou numa maior compactação superficial e formação de crosta nuns pontos relativamente a outros.

A maior dimensão das gotas aplicadas com os aspersores com deflectores estriados não implica só maiores energias de impacto mas também um maior efeito de salpico, com o consequente destacamento de partículas de solo, conforme foi possível verificar durante os ensaios realizados. Este maior efeito de salpico provocado por gotas de maiores dimensões relativamente ao de gotas mais pequenas foi também observado por Bubenzer & Jones (1971) nos seus trabalhos.

Além da energia de impacto, o maior destacamento de partículas de solo, peça fundamental do mecanismo de formação da crosta (McIntyre, 1958), terá influenciado a existência de uma crosta de maior espessura. A camada de solo constituída por esta crosta superficial terá menor porosidade, o que irá afectar a condutividade hidráulica superficial do solo, que apresentará menores valores com a diminuição da porosidade. Apesar de alguma heterogeneidade dos valores determinados no campo, os valores médios mostraram que para ambos os tipos de deflector existiu uma diminuição do valor da condutividade hidráulica ao longo dos ensaios (de 3,0 cm/h para 1,5 a 2,0 cm/h) que, apesar de não ser estatisticamente significativa ($p>0,05$), terá influenciado a infiltrabilidade do solo.

3.3. Escolha da equação da infiltrabilidade a usar no dimensionamento e avaliação dos sistemas

O objectivo mais comum, quer na fase de dimensionamento quer na de avaliação, é conseguir um sistema que funcione sem a ocorrência de escorramento. Como as equações da infiltrabilidade foram todas elas determinadas com base nos valores da água infiltrada até à saturação superficial do solo, à partida qualquer uma delas cumpriria esse objectivo. No entanto, verifica-se que as equações apresentam diferentes valores consoante a condição do solo em que foram determinadas e, na dificuldade prática de efectuar diversos ensaios para diferentes condições de solo, torna-se necessário escolher uma situação que dê mais segurança ao processo de cálculo.

Após a discussão dos resultados obtidos durante este trabalho, parece evidente que a condição mais fiável será a de solo seco mas que já tenha sofrido aplicações de água anteriores. As equações obtidas nestes ensaios apresentam valores idênticos aos obtidos em situações de maior humidade do solo, e a probabilidade da rega se efectuar nestas mesmas condições de solo será certamente maior do que qualquer uma das outras ensaiadas.

Na figura 5 apresentam-se as equações determinadas nestas condições nos dois anos de ensaios. Comparando as diferentes curvas apresentadas pode-se observar mais uma vez que a infiltrabilidade do solo apresenta sempre valores inferiores nos ensaios com deflectores estriados relativamente aos mesmos ensaios com deflectores lisos, principalmente no início do processo. Esta variação é ainda mais nítida com o aumento da intensidade de aplicação da água.

Também se observa que o aumento da intensidade pluviométrica, que ocorreu no segundo ano de ensaios, provocou um aumento dos valores determinados para a infiltrabilidade do solo para tempos até aos 25-30 min, valor idêntico à duração da maior parte dos ensaios de infiltração. Esta diferença indica que a utilização de curvas da infiltrabilidade para avaliação da rega exige que a sua obtenção tenha sido baseada em ensaios realizados com a mesma taxa de aplicação de água que se prevê

utilizar na rega; caso contrário, os resultados obtidos poderão ser enganadores. A esta mesma conclusão já tinham chegado outros autores, como por exemplo DeBoer & Chu (1994).

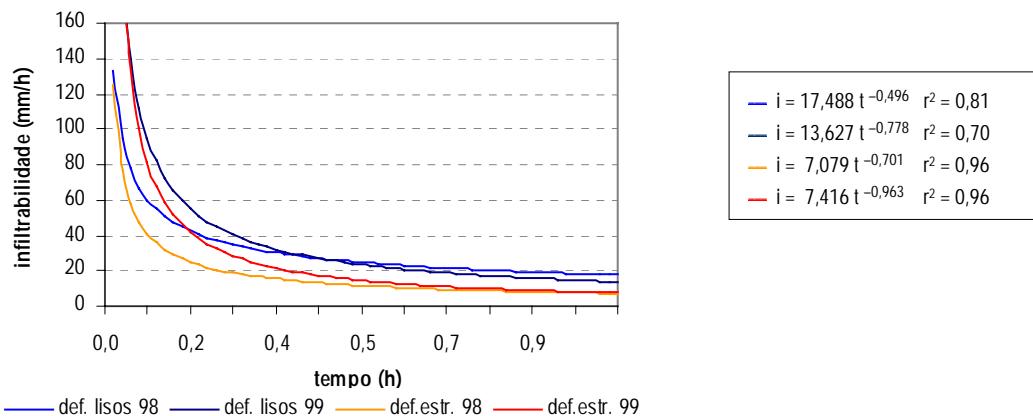


Figura 5 – Equações da infiltrabilidade referentes ao 3º ensaio de infiltração.

4. CONCLUSÕES

Verificou-se que a infiltrabilidade do solo diminui bastante com o aumento do teor de água na camada superficial, mas também com a maior compactação superficial do solo. Para a mesma intensidade de aplicação observa-se que a utilização de deflectores estriados conduz a uma infiltrabilidade mais reduzida devido essencialmente a uma maior compactação da superfície do solo.

Como informação de base para o dimensionamento dos sistemas de rega aconselha-se a utilização de equações obtidas em ensaios com o solo seco, mas que já tenha estado sujeito a outras aplicações de água anteriores, que possam ter facilitado a formação de crosta superficial.

Das várias equações tipo da infiltrabilidade ensaiadas, foi a equação do tipo Kostiakov aquela que melhor se ajustou aos valores obtidos nos vários ensaios de infiltração. Este melhor ajustamento deve-se por um lado às características particulares dos ensaios de infiltração (que têm curta duração e terminam com o início da saturação superficial do solo) e por outro à maior elasticidade que esta equação apresenta nos processos de optimização matemática, relativamente a outras expressões mais complexas.

BIBLIOGRAFIA

- BASAHI, J.M., A.L. KENIMER, G. FIPPS & G.J. SABBAGH (1998) The effect of droplet impact energy produced by sprinkler system on soil erosion, runoff and infiltration rate. *ASAE Paper nº 98-2060*.
- BOSCH, D.D. & C.A. ONSTAD (1988) Surface seal hydraulic conductivity as affected by rainfall. *Transactions of the ASAE*, vol. 31 (4), p.1120-1127.
- BRADFORD, J.M., J.E. FERRIS & P.A. REMLEY (1987) Interrill soil erosion processes: I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff and soil splash detachment. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 51, p. 1566-1571.
- BUBENZER, G.D. & B.A. JONES (1971) Drop size and impact velocity effects on the detachment of soil under simulated rainfall. *Transactions of the ASAE*, vol. 14 (4), p. 625-628.
- CHU, S.T. (1987) Generalized Mein-Larson infiltration model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 113, nº 2, p. 155-162.
- CHU, S.T., C.A. ONSTAD & W.J. RAWLS (1987) Macropores in the soil infiltration process. *ASAE Paper nº 87-2532*.
- DAVIS, J.C. (1986) *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, New York.

- DEBOER, D.W., D.L. BECK & A.R. BENDER (1992) A field evaluation of low, medium and high pressure sprinklers. *Transactions of the ASAE*, vol. 35 (4), p.1185 - 1189.
- DEBOER, D.W. & S.T. CHU (1994) Application-rate-dependent soil infiltration and center-pivot irrigation runoff. *Report N.94-A-015*. AGENG-94, Milano.
- HUSSEN, A.A. & A. W. WARRICK (1995) Tension infiltrometers for the measurement of vadose zone hydraulic properties, in WILSON *et al.* (eds.) *Handbook of vadose zone characterization and monitoring*, cap. 13, p. 177-187. Lewis Publishers
- KELLER, J. & R. BLIESNER (1990) *Sprinkle and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- KINCAID, D.C. (1996) Spraydrop kinetic energy from irrigation sprinklers. *Transactions of the ASAE*, vol. 39 (3), p.847-853.
- KINCAID, D.C., D.F. HEERMANN & E.G. KRUSE (1969) Application rates and runoff in center-pivot sprinkler irrigation. *Transactions of the ASAE*, vol. 12 (6), p.790-794, 797.
- KINCAID, D.C., K.H. SOLOMON & J.C. OLIPHANT (1996) Drop size distributions for irrigation sprinklers. *Transactions of the ASAE*, vol. 39 (3), p.839-845.
- MCINTYRE, D.S. (1958) Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Science*, vol.85, nº 5, p. 261-266.
- MELLO, F.C.M. (1984) A infiltração em condições de submersão: uma aproximação numérica ao método de Philip. *Revista da Assoc. Portuguesa de Recursos Hídricos*, nº 5 (1), p. 79-93.
- MOHAMMED, D. & R.A. KOHL (1987) Infiltration response to kinetic energy. *Transactions of the ASAE*, vol. 30 (1), p.108-111.
- MOORE, I.D. (1981) Effect of surface sealing on infiltration. *Transactions of the ASAE*, vol. 24 (6), p.1546-1552, 1561.
- MORIN, J., Y. BENYAMINI & A. MICHAELI (1981) The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. *Journal of Hydrology*, vol. 52, p. 321-335.
- PALTINEAU, I.C. & J.L. STARR (1997) Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 61, p. 1576-1585.
- PERROUX, K.M. & I. WHITE (1988) Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, vol.52 (5), p.1205-1214.
- SERAFIM, A.M.P.B. (1994) *Sobre a implantação de rampas polares: alguns aspectos em análise e síntese*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agronómica. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.
- SERRALHEIRO, R.P. (1988) *Um estudo da rega por sulcos num solo argiluviado*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola. Universidade de Évora, Évora.
- SILVA, L.L. (2001) *O efeito das características de aplicação da água sobre a infiltração num solo Mediterrâneo regado por rampa rotativa*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola. Universidade de Évora, Évora.
- STATSOFT (1995) *Statistica for Windows. Vol I: General conventions and Statistics I*. Statsoft.
- UNDERSANDER, D.J., T.H. MAREK & R.N. CLARK (1985) Effect of nozzle type on runoff and yield of corn and sorghum under center pivot sprinkler systems. *Irrigation Science*, nº 6, 107-116.