

Influência da qualidade da água de rega num Fluvissole do Alentejo

Effect of soil water quality in a Fluvisol in Alentejo

M. C. Gonçalves¹, J. C. Martins, T. B. Ramos, M. J. Neves,
F. P. Pires & M. L. Fernandes

RESUMO

Num Fluvissole localizado em Alvalade-Sado (Alentejo) foram construídos 3 monólitos de solo (A, B e C), os quais foram regados, ao longo dos ciclos de rega de 2001 a 2005, com águas de diferente qualidade (Maio a Agosto) e sujeitos a condições atmosféricas durante os restantes meses do ano. Em cada um dos monólitos de solo foi aplicada uma dotação total anual média de 500 mm, cuja qualidade variou com o aumento das concentrações de NaCl, CaCl₂ e MgCl₂ presentes na água de rega. A condutividade eléctrica (CE) das águas de rega aplicadas variou entre 0,3 e 3,2 dS m⁻¹, sendo as águas de melhor qualidade aplicadas no monólito A e as de pior qualidade aplicadas no monólito C. A razão de adsorção de sódio (SAR) foi de 1, 3 e 6 (meq L⁻¹)^{0.5}, mantendo a relação Ca:Mg = 1:2 nas águas aplicadas. No fim de cada ciclo de rega, de cada período de “lavagem” pela chuva e no fim do ensaio (Dezembro de 2005) avaliaram-se os efeitos da aplicação das águas de rega na salinização e sodização do solo. Os parâmetros analisados foram a CE e os teores de catiões solúveis no extracto de satura-

ção do solo, os teores de catiões extraíveis, a capacidade de troca catiónica, o SAR e a percentagem de sódio de troca (ESP). No fim do ensaio avaliaram-se ainda as propriedades hidráulicas e a estabilidade da microestrutura do solo. Realizou-se também um balanço de sais entre os diferentes períodos estudados. No final do ensaio os valores da CE, embora superiores aos iniciais, não ultrapassavam 2 dS m⁻¹. A precipitação ocorrida ao longo do ensaio foi assim suficiente para proporcionar a lavagem dos sais, sobretudo até à profundidade dos 40 cm. Por sua vez o SAR aumentou com as regas, mais notoriamente até aos 40 cm, não sendo tão evidente o efeito de lavagem pela chuva, registando-se no fim do ensaio aumentos de 4, 5 e 9 vezes os valores iniciais de cada monólito. O comportamento do ESP foi semelhante ao do SAR, embora os valores finais não provoquem riscos imediatos de sodização do solo (6% nas condições mais desfavoráveis). O balanço dos sais indicou uma acumulação de sódio de cerca de 2,5 e 4 vezes nos monólitos B e C. Verificou-se ainda uma lixiviação importante daquele catião no monólito C. Não se verificaram alterações dignas de nota nas propriedades

¹ Estação Agronómica Nacional, Departamento de Ciência do Solo, Av. República, 2784-505 Oeiras, Portugal – Telef: (+351) 214403638 – Fax: (+351) 214416011 – E-mail: mc.goncalves@netc.pt

hidráulicas e microestrutura do solo. As pequenas variações verificadas devem-se certamente à variação espacial daquelas propriedades.

ABSTRACT

Three soil lysimeters (A, B, and C) were built in a Fluvisol located in Alvalade-Sado (Alentejo). The soil lysimeters were irrigated from 2001 to 2005 with waters of different quality (May to August), and subjected to atmospheric conditions during the remaining months of the year. A total depth of 500 mm was applied every year in each soil lysimeter. The quality of the irrigation waters varied by increasing the concentration of NaCl, CaCl₂ e MgCl₂ in its composition. The electrical conductivity (*EC*) of the irrigation waters applied varied between 0.3 and 3.2 dS m⁻¹, with the best quality waters being applied in soil lysimeter A, and the worse quality waters being applied in soil lysimeter C. The sodium adsorption ratio (*SAR*) was 1, 3 and 6 (meq L⁻¹)^{0.5}, always maintaining a relation Ca:Mg = 1:2 in the irrigation waters. Effects on soil salinization/sodification resulting from applying those irrigation waters were evaluated in the end of each irrigation season, in the end of each leaching season, and in the end of the experiment (December 2005). The parameters monitored were the *EC* and soluble cations, the saturation extract, extractable cations, the cation exchange capacity, *SAR* and the exchangeable sodium percentage (*ESP*). Soil hydraulic properties and soil microaggregation stability was also monitored in the end of the experiment. A mass balance for salt concentration along the different seasons was also calculated. In the end of the experiment, *EC* values although higher than the values presented in the initial conditions, were inferior to 2 dS m⁻¹.

Rainfall was enough to leach salts mainly until 40 cm depth. *SAR* increased with irrigation notoriously until 40 cm depth, not being evident the effect of rainfall on leaching. Final values were 4, 5 and 9 times higher than the initial ones in soil lysimeters A, B and C, respectively. *ESP* behaviour was similar to *SAR*. Final values were not high enough to cause soil sodification (only 6% in the most unfavorable conditions). The salt balance showed an accumulation of sodium 2.5 to 4 times higher than the initial conditions in soil lysimeters B, and C, respectively. An important amount of sodium was leached from soil lysimeter C. No changes were observed in soil hydraulic properties and soil microaggregation stability. The small variations present were due to spatial variability of those soil properties.

INTRODUÇÃO

O problema da má qualidade da água de rega torna-se particularmente importante quando é aplicada a solos de cinética lenta, como é o caso dos solos de texturas finas e médias existentes no Alentejo, e em zonas com valores baixos do superavit hídrico anual, que também é o caso daquela região. A conjugação destes factores associada ainda à carência ou insuficiência de drenagem na maior parte dos aproveitamentos hidroagrícolas implantados a Sul do Tejo mostra que os riscos de salinização não foram contemplados no planeamento daquelas instalações de regadio (Alvim, 1980; Alvim & Nunes, 1984). De acordo com o Estudo Integrado de Impacte Ambiental de Alqueva, a má qualidade da água de rega poderá provocar problemas graves na qualidade do solo do futuro perímetro de rega (Sequeira *et al.*, 1995).

A avaliação do risco de salinização e sodização do solo deve ter em consideração

vários aspectos como a textura, a mineralogia da argila, a razão de adsorção de sódio (*SAR*), a percentagem de sódio de troca (*ESP*), a capacidade de troca catiónica (*CTC*) e a concentração electrolítica da solução do solo, para além dos parâmetros para avaliar a qualidade da água de rega. A acumulação no solo de catiões dispersivos, tais como o sódio e por vezes também o magnésio e o potássio, promove a expansão e/ou a dispersão da argila alterando a geometria dos poros do solo o que afecta a sua permeabilidade, a retenção de água e a produtividade das culturas (Keren, 2000).

Este estudo tem como objectivo avaliar os riscos de salinização e de sodização de um Aluviossolo de textura mediana, resultantes da utilização de águas de rega de qualidade variável. Os estudos foram realizados durante 5 anos (2001-2005) e alguns dos resultados já foram parcialmente descritos por

Gonçalves *et al.* (2004, 2005). Neste trabalho apresentam-se as conclusões do estudo, analisam-se possíveis alterações na microestrutura e nas propriedades hidráulicas do solo, e efectua-se um balanço de massa dos catiões Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , até um metro de profundidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Utilizaram-se os monólitos de solo descritos em Gonçalves *et al.* (2004, 2005), situados no Posto de Culturas Regadas D. Manuel Castello Branco, Alvalade-Sado. Estes monólitos, designados por A, B e C, foram construídos em 2001 com $1.2 \text{ m}^2 \times 1 \text{ m}$, com isolamento lateral, drenagem livre e sujeitos a condições atmosféricas. O solo em estudo é um Aluviossolo Moderno Não Calcário de textura mediana, ou Fluviossolo

QUADRO 1 – Características físicas e químicas do Aluviossolo estudado (solo inicial)

Profundidade (cm)	0-48	48-85	85-170
Areia grossa, g kg^{-1}	62	51	61
Areia fina, g kg^{-1}	532	468	428
Limo, g kg^{-1}	296	292	282
Argila, g kg^{-1}	110	189	229
Textura	Franco-limosa	Franco-limosa	Franca
Massa volúmica aparente, Mg m^{-3}	1,49	1,51	1,61
Matéria orgânica, g kg^{-1}	14,7	9,3	7,9
<i>EC</i> , dS m^{-1}	0,20	0,23	0,23
pH (H_2O)	5,94	6,58	6,74
Catiões solúveis, $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$			
Na^+	0,025	0,033	0,036
Mg^{2+}	0,025	0,019	0,019
Ca^{2+}	0,031	0,022	0,024
Catiões extraíveis, $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$			
Na^+	0,145	0,216	0,217
Mg^{2+}	2,188	2,700	2,813
Ca^{2+}	4,663	5,850	6,200
<i>CTC</i> , $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	12,00	13,12	13,28
<i>SAR</i> , $(\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})^{0.5}$	0,756	1,260	1,296
<i>ESP</i> , %	1,00	1,39	1,36

QUADRO 2 – Composição iónica das águas de rega aplicadas aos monólitos

Monólito		EC	SAR	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
		dS m ⁻¹	(mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}	mmol _c L ⁻¹		
Águas I	A	0,3	1,0	1,00	1,00	1,00
	B	0,8	3,0	1,28	2,56	4,16
	C	1,6	6,0	1,93	3,86	10,21
Águas II	A	0,8	1,5	1,85	3,65	2,50
	B	1,6	3,0	3,16	6,32	6,52
	C	3,2	6,0	5,10	10,20	16,70

Êutrico, cujas características físicas e químicas se encontram descritas no Quadro 1 (condição inicial do solo).

Os monólitos foram regados manualmente (aplicações de 20 mm), de modo a manter um teor de água no solo entre 25 e 35%, próximo do valor correspondente à capacidade de campo, ou mesmo acima, a fim de possibilitar a extracção da solução do solo. A composição iónica das águas de rega aplicadas encontra-se no Quadro 2. Naquele Quadro, a água designada por I A é a água proveniente da albufeira de Campilhas, de boa qualidade e que é aplicada no perímetro de rega onde se efectuaram os ensaios. As restantes águas de rega foram “fabricadas”, a partir daquela, com adição de concentrações crescentes de cloreto de sódio, de cálcio e de magnésio. A água de pior qualidade (CE de 3,2 dS m⁻¹) corresponde a um valor extremo mas, por vezes observado nos perímetros de rega da região (Oliveira & Varela, 2005). As águas de rega designadas por I aplicaram-se nos dois primeiros ciclos

de rega e as designadas por II nos dois últimos. Após os períodos de rega (Maio/Junho a Agosto/Setembro) os monólitos foram sujeitos à lavagem pela chuva no período de Setembro a Março/Abril do ano seguinte (até à data em que se procedeu à amostragem do solo). A quantidade de água aplicada em cada rega e a precipitação ocorrida até às datas de amostragem, encontram-se no Quadro 3.

No fim dos períodos de rega e de lavagem pela chuva colheram-se amostras de solo em cada um dos monólitos, a 5 profundidades (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm), para determinação da condutividade eléctrica (CE), dos teores de catiões solúveis e do SAR no extracto de saturação do solo, dos teores de catiões extraíveis e de troca, da CTC e do ESP. É de referir que as amostragens iniciais e finais foram efectuadas por camada/horizonte de solo, e não geometricamente. Os teores de catiões solúveis foram determinados por espectrofotometria de absorção atómica. A determinação dos

QUADRO 3 – Quantidade de água aplicada nas regas, precipitação ocorrida e duração dos ciclos de rega e de lavagem pela chuva.

Ano	Rega (mm)			Precipitação ocorrida (mm)		Data de amostragem do solo
	Total	Início	Fim	Total	Início	
2001	500	Maio	Agosto	440	Setembro 01	Maio 02
2002	504	Junho	Setembro	570	Setembro 02	Março 03
2003	456	Maio	Agosto	388	Setembro 03	Março 04
2004	504	Junho	Agosto	180	Setembro 04	Abril 05
2005	-	-	-	250	Maio 05	Dezembro 05

teores de catiões extraíveis foi efectuada pelo método da trietanolamina e cloreto de bário (TEA+BaCl₂) a pH 8,1, a capacidade de troca catiónica pelo método de Bascomb, descritos na ISO 13536-1995 e por Mesquita & Alvim (1981). Os teores de catiões de troca obtiveram-se pela diferença entre os teores de catiões extraíveis e os de catiões solúveis.

Neste trabalho utilizou-se a *CE* do extracto de saturação do solo como indicador da salinidade do solo e os parâmetros *ESP* e *SAR* para caracterizar a sodicidade do solo.

O *SAR* e o *ESP* são definidos por:

$$SAR = \frac{Na^+ \text{ solúvel}}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} \text{ solúvel} + Mg^{2+} \text{ solúvel})}{2}}} \quad (1),$$

onde Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ são as concentrações dos catiões solúveis do extracto de saturação, expressas em mmol_c L⁻¹, e:

$$ESP = \frac{Na^+ \text{ troca}}{CTC} \times 100 \quad (2),$$

em que Na⁺ é a quantidade de sódio adsorvido (cmol_c kg⁻¹ de solo).

Realizou-se uma análise de variância das variáveis *CE*, *ESP* e *SAR*, para os 3 monólitos, 5 profundidades de medida, datas de observação e diferentes qualidades de água aplicada. Para esta análise seleccionaram-se datas consideradas importantes, tais como, o início dos ensaios (Maio 2001 - Água I, Maio 2003 - Água II), o fim dos ciclos de rega (Setembro de 2001, 2002 - Água I; Setembro de 2003 e 2004 - Água II), após 7 meses de lavagem pela água da chuva (Abril 2005) e no final do ensaio (Dezembro de 2005). Foi efectuada o teste LSD (Least Significant Differences) para a comparação de médias, para um nível de significância de 5%.

Efectuou-se um balanço de massa dos catiões extraíveis, Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, até 1 m

de profundidade, nos 3 monólitos. Em cada monólito, a massa total acumulada de cada catião resultou da diferença entre a sua massa total final, medida em Dezembro de 2005, e a sua massa total inicial medida em Maio de 2001. A quantidade lixiviada de cada catião foi obtida por diferença entre a massa total acumulada e a massa total aplicada na rega. As massas totais iniciais e finais de cada catião até 1 m de profundidade foram calculadas pelo somatório do produto da concentração média medida em cada camada pelo respectivo volume.

As propriedades hidráulicas do solo foram medidas laboratorialmente, em amostras no estado natural, no início e no fim dos ensaios (Maio 2001 e Dezembro de 2005), nas 3 camadas identificadas no perfil daquele solo, e parametrizadas com o modelo de Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980). Para a determinação da curva característica de humidade do solo utilizaram-se os métodos clássicos das caixas de areia e de areia + caulino, da placa de pressão e da evaporação. Para determinação da curva da condutividade hidráulica utilizaram-se os métodos da crosta, do ar quente e da evaporação. A condutividade hidráulica saturada foi medida com o método da carga constante. As metodologias referentes à determinação das propriedades hidráulicas encontram-se descritas em Gonçalves *et al.* (2000).

A influência da qualidade da água de rega na estabilidade da microestrutura do solo, foi determinada a partir do coeficiente de Alten e da razão de Middleton utilizando o método de Graçanin modificado (Silva *et al.*, 1975), nas amostras de terra colhidas nos 3 monólitos na última data de amostragem. O coeficiente de Alten ou razão argila (S/D) considera-se como a razão entre a percentagem de argila obtida sem dispersante (S) e a percentagem de argila obtida com dispersante (D); a razão de Middleton (S'/D') ou razão limo+argila (partículas de

diâmetro inferior a 0.02 mm) corresponde à razão entre a percentagem de limo+argila obtida sem dispersante (S') e a percentagem de limo+argila obtida com dispersante (D').

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Evolução da composição química do solo

Nos Quadros 4, 5 e 6 apresentam-se os resultados da evolução da *CE* medida no extracto de saturação do solo, do *SAR* e do *ESP*, respectivamente, ao longo dos 5 anos do ensaio. Os resultados correspondem às amostras colhidas em 5 espessuras do solo após os ciclos de rega e de lavagem pela chuva. Como já foi referido, neste trabalho utilizou-se a *CE* como indicador da salinidade e os parâmetros *ESP* e *SAR* para caracterizar a sodicidade do solo.

Os resultados indicados no Quadro 4 mostram, como seria de esperar, um aumento pronunciado da salinidade nas camadas superficiais do solo após as regas, atingindo-se máximos de cerca de 1,5, 4 e 6 dS m⁻¹ nos monólitos A, B e C,

respectivamente. Segundo Martins *et al.* (2001), no solo regado com a água 0,8 e 1,6 dS m⁻¹ (monólito B), a *CE* situa-se na classe de 2-4 dS m⁻¹, em que as culturas muito sensíveis podem ser afectadas nos seus rendimentos. No solo regado com água C, segundo os mesmos autores, a *CE* situa-se na classe de 4-8 dS m⁻¹, em que é ainda possível o cultivo de muitas espécies, mas semi-tolerantes à salinidade. Com os períodos chuvosos verificou-se uma lavagem até cerca dos 40 cm de profundidade, e uma acumulação de sais nas camadas inferiores até cerca de 80 cm, com valores máximos de cerca de 1,5, 2,5 e 3 dS m⁻¹. No final do ensaio, os valores da *CE* revelam, em relação ao valor inicial do solo, um aumento médio de 2, 4,5 e 3 vezes para a profundidade de 0 a 40 cm, de 3,5, 10 e 8 vezes de 40 a 80 cm e de 3, 4,5 e 9 vezes de 80 aos 100 cm de profundidade, para os monólitos A, B e C, respectivamente. É de salientar que os valores da *CE* mais elevados verificados em Dezembro de 2005 praticamente não ultrapassam os 2 dS m⁻¹ nas camadas de 40-100 cm, mesmo nos monólitos B e C. Na camada superficial do solo, embora

QUADRO 4. Evolução da *CE* (dS m⁻¹) do solo nos 3 monólitos (A, B e C), de Maio de 2001 a Dezembro de 2005

Prof. (cm)	Mai 01	Set 01	Mai 02	Set 02	Mar 03	Set 03	Mar 04	Set 04	Abr 05	Dez 05
A 0-20	0,20	0,81	0,23	0,42	0,29	1,31	0,33	1,50	0,62	0,43
A 20-40	0,20	0,25	0,22	0,39	0,14	0,60	0,37	0,81	1,05	0,43
A 40-60	0,23	0,17	0,23	0,25	0,20	0,40	0,49	0,91	1,47	0,81
A 60-80	0,23	0,19	0,25	0,21	0,27	0,35	0,68	0,84	1,10	0,81
A 80-100	0,23	0,20	0,27	0,10	0,30	0,29	0,78	0,90	0,65	0,63
B 0-20	0,20	1,33	0,28	0,92	0,28	3,80	0,29	3,47	2,52	0,90
B 20-40	0,20	0,56	0,33	0,91	0,31	1,69	0,35	1,54	1,80	0,90
B 40-60	0,23	0,44	0,59	0,76	0,41	0,95	0,81	1,77	1,79	2,21
B 60-80	0,23	0,32	0,54	0,69	0,56	0,87	1,20	1,63	1,52	2,21
B 80-100	0,23	0,34	0,47	0,57	0,60	0,77	1,16	1,55	1,25	1,04
C 0-20	0,20	2,65	0,31	0,87	0,35	5,41	0,39	5,85	5,79	0,70
C 20-40	0,20	1,02	0,31	1,24	0,23	3,40	0,63	3,24	3,22	0,70
C 40-60	0,23	0,46	0,61	1,28	0,35	2,37	1,69	3,07	3,56	1,86
C 60-80	0,23	0,33	0,85	1,25	0,39	1,70	2,35	3,22	3,12	1,86
C 80-100	0,23	0,24	0,81	1,14	0,48	1,34	2,51	2,87	2,51	2,12

QUADRO 5. Evolução do SAR do solo nos 3 monólitos (A, B e C), de Maio de 2001 a Dezembro de 2005

Prof. (cm)	Mai 01	Set 01	Mai 02	Set 02	Mar 03	Set 03	Mar 04	Set 04	Abr 05	Dez 05
A 0-20	0,76	0,87	1,05	1,65	1,66	2,04	2,63	3,03	3,19	3,16
A 20-40	0,76	1,00	1,39	1,19	1,22	1,70	2,34	2,50	2,70	3,16
A 40-60	1,26	1,14	1,26	1,38	1,43	1,88	1,74	1,83	2,02	1,78
A 60-80	1,26	1,24	1,22	1,53	1,60	1,54	1,53	1,56	1,55	1,78
A 80-100	1,30	1,86	2,03	2,33	2,58	1,94	1,86	2,01	2,02	3,20
B 0-20	0,76	1,73	2,36	3,56	2,99	3,69	2,94	4,15	4,87	4,05
B 20-40	0,76	1,30	1,82	2,54	2,79	2,49	3,86	3,74	4,13	4,05
B 40-60	1,26	1,05	1,29	1,61	2,21	2,13	3,06	3,11	3,30	2,31
B 60-80	1,26	1,29	1,75	1,50	1,87	1,56	2,10	2,22	2,33	2,31
B 80-100	1,30	2,13	2,23	2,11	1,80	1,58	1,65	1,56	1,82	1,89
C 0-20	0,76	3,87	3,34	5,98	3,81	6,78	5,04	7,04	7,98	7,04
C 20-40	0,76	1,98	2,36	4,49	3,62	5,15	6,81	6,66	7,42	7,04
C 40-60	1,26	1,26	1,54	2,19	3,71	4,06	5,71	5,72	6,01	5,01
C 60-80	1,26	1,60	1,47	1,58	2,56	2,72	3,91	3,92	3,41	5,01
C 80-100	1,30	1,72	2,53	1,90	2,13	2,10	2,71	2,91	2,19	2,65

tenha havido um ligeiro acréscimo relativamente ao valor inicial (2001), a CE não ultrapassa 1 dS m^{-1} . Importa ainda relevar o facto de os valores da CE, nos 3 monólitos, em Abril de 2005, não terem descido acentuadamente em relação a Setembro de 2004, tal como aconteceu em Março de 2004 relativamente a Setembro de 2003, devido a ter ocorrido no período Outono-Invernal de 2004/2005, apenas 180 mm (ano extremamente seco) e portanto uma deficiente lavagem de sais.

Na análise destes resultados, deve-se ter em conta que este solo apresenta características hidráulicas favoráveis, com uma condutividade hidráulica saturada de cerca de 20 cm/dia nos primeiros 40 cm e cerca de 4x superior na camada subjacente (Gonçalves *et al.*, 2004), o que facilita o processo de lavagem dos sais. Martins *et al.* (2001) nos seus estudos em colunas de solos, encontraram situações mais problemáticas pois estudaram solos de cinética mais lenta.

No Quadro 5 apresenta-se a evolução do SAR do extracto de saturação do solo. A relação entre o Na solúvel e o Na adsorvido não depende apenas das concentrações do sódio dissolvido na solução, mas também

das concentrações de cálcio e magnésio presentes. Os valores do SAR foram aumentando com as regas, mais notoriamente até aos 40 cm, não sendo tão evidente como no caso da CE o efeito da lavagem pela chuva. No final do ensaio o SAR atingiu, na camada superficial, valores de 3, 4 e 7 (monólitos A, B e C, respectivamente) que representam um aumento de 4, 5 e 9 vezes em relação aos valores iniciais.

Os valores do ESP (Quadro 6) também aumentaram nas camadas superficiais devido à rega, tendo atingido valores máximos, na camada de 0-20 cm, de cerca de 4 % nos monólitos A e B, e de 8 % no monólito regado com as águas mais salinas ($1,6$ e $3,2 \text{ dS m}^{-1}$). A lavagem pela chuva originou reduções moderadas naquele parâmetro, tendo no caso do monólito C sido reduzido para 6% na camada superficial (0-20 cm), apresentando contudo esse mesmo valor na camada de 20-40, e de 5% nas camadas de 40 a 80 cm. Essas mesmas camadas do monólito C (condições mais desfavoráveis) apresentavam ainda valores de SAR de cerca de 7 e 5 (meq L^{-1})^{0,5}, respectivamente, embora a CE fosse baixa na camada superficial ($0,70 \text{ dS m}^{-1}$) e

QUADRO 6. Evolução do ESP do solo nos 3 monólitos (A, B e C), de Maio de 2001 a Dezembro de 2005

Prof. (cm)	Mai 01	Set 01	Mai 02	Set 02	Mar 03	Set 03	Mar 04	Set 04	Abr 05	Dez 05
A 0-20	1,00	0,76	0,84	1,19	1,14	1,94	1,48	4,10	2,71	4,02
A 20-40	1,00	0,97	0,75	0,97	0,99	1,17	1,58	3,19	2,83	4,02
A 40-60	1,38	1,17	0,93	1,14	1,12	1,11	1,15	2,69	1,48	3,22
A 60-80	1,38	1,65	0,86	1,20	1,18	1,56	1,18	2,64	2,25	3,22
A 80-100	1,39	2,23	1,45	1,87	2,06	1,90	1,42	2,67	1,75	2,86
B 0-20	1,00	2,73	1,80	1,35	1,79	3,16	2,16	4,49	3,24	3,55
B 20-40	1,00	2,78	1,74	2,16	1,93	2,67	3,11	5,20	2,63	3,55
B 40-60	1,38	1,42	1,52	1,39	1,39	2,03	2,19	5,56	1,27	3,12
B 60-80	1,38	1,51	1,21	1,18	1,12	1,77	1,69	4,98	1,88	3,12
B 80-100	1,39	2,52	1,92	1,20	1,25	1,75	1,53	3,72	1,19	2,81
C 0-20	1,00	3,20	2,26	4,62	2,15	8,09	3,34	6,32	6,66	6,28
C 20-40	1,00	2,64	1,87	2,90	2,32	7,01	5,33	7,65	5,22	6,28
C 40-60	1,38	1,35	1,23	1,68	1,96	3,09	4,62	6,81	4,15	5,26
C 60-80	1,38	1,14	1,15	1,54	1,79	1,97	3,84	6,50	2,95	5,26
C 80-100	1,39	2,56	1,46	2,00	1,80	1,69	2,68	3,15	1,35	2,65

não tivesse ultrapassado valores de cerca de 2 dS m^{-1} nas camadas mais profundas. Os valores finais de ESP, embora bastante superiores aos valores iniciais, não implicarão riscos imediatos de sodização do solo, já que só para valores de ESP superiores a 15% é provável a ocorrência daquele fenómeno. Contudo, em certos solos de textura fina, um $ESP=10\%$ pode já originar problemas de desfloculação de argilas e portanto de estabilidade de estrutura (Greene *et al.* 1978).

No Quadro 7 apresenta-se o resumo da análise de variância das variáveis CE, SAR e

ESP, para os 3 monólitos, 5 profundidades de medida, diferentes datas de observação, e diferentes qualidades de água aplicadas (Quadro 2). Para esta análise seleccionaram-se datas consideradas importantes tais como os valores das variáveis obtidos no início dos ensaios (Maio 2001 - Água I; Maio 2003 - Água II), no fim dos ciclos de rega (Setembro de 2001, 2002 - Água I; Setembro de 2003 e 2004 - Água II), após 7 meses de lavagem pela água da chuva (Abril 2005) e no final do ensaio (Dezembro de 2005). Na análise de variância utilizaram-se os resultados indicados nos Quadros 4, 5 e 6.

QUADRO 7. Resumo da análise de variância das variáveis CE, SAR e ESP (Teste F)

O.V.	CE			SAR			ESP		
	Água I	Água II	Ini./Fim	Água I	Água II	Ini./Fim	Água I	Água II	Ini./Fim
Data (D)	14,26***	99,16***	51,15***	20,54***	38,24**	90,45***	8,37**	42,87***	103,8***
Monólito (M)	12,11***	75,62***	18,92***	8,35**	182,6***	42,64***	8,04**	21,91***	29,29***
Prof. (P)	4,30*	23,44***	1,16n,s	3,39*	47,13***	12,73***	2,42n,s,	4,26*	10,10***
D x M	3,36*	17,22***	10,06**	2,65n,s,	8,86***	11,06***	3,71*	2,90*	7,36**
D x P	4,17**	7,89***	2,42*	3,30*	5,14**	6,82***	2,05n,s,	1,85n,s,	5,20**
M x P	0,27n,s	2,69*	0,47n,s,	2,92*	13,30***	3,25*	2,70*	2,20n,s,	2,69*

ns – não significativas; * - $P < 0.05$; ** - $P < 0.01$; *** - $P < 0.001$; Água I e II (composições indicada no Quadro 2).

QUADRO 8. Comparação de médias (teste LSD para as variáveis CE, SAR e ESP)

	CE			SAR			ESP		
	Água I	Água II	Ini./Fim	Água I	Água II	Ini./Fim	Água I	Água II	Ini./Fim
Data*									
1	0,22 c	0,34 c	0,22 c	1,07 c	2,40 c	1,07 b	1,23 b	1,60 c	1,23 c
2	0,62 b	1,68 b	2,13 a	1,60 b	2,76 b	3,66 a	1,91 a	2,73 b	2,77 b
3	0,73 a	2,21 a	1,17 b	2,37 a	3,46 a	3,63 a	1,76 a	4,64 a	3,95 a
Monólito									
A	0,27 c	0,61 c	0,61 c	1,30 b	1,90 c	1,99 b	1,29 b	1,96 c	2,30 b
B	0,53 b	1,35 b	1,15 b	1,61 b	2,53 b	2,43 b	1,63 ab	2,85 b	2,16 b
C	0,77 a	2,28 a	1,77 a	2,13 a	4,19 a	3,94 a	1,99 a	4,15 a	3,48 a
Prof.									
0-20	0,84 a	2,47 a	1,28 a	2,22 a	3,91 a	3,62 a	1,87 a	3,69 a	3,27 a
20-40	0,55 b	1,33 b	0,97 a	1,64 b	3,32 b	3,42 a	1,71 a	3,57 a	3,06 a
40-60	0,45 b	1,16 b	1,38 a	1,38 b	2,90 c	2,69 b	1,37 a	2,86 ab	2,52 b
60-80	0,41 b	1,09 b	1,26 a	1,39 b	2,17 d	2,24 bc	1,37 a	2,61 b	2,53 b
80-100	0,36 b	1,01 b	0,99 a	1,77 ab	2,07 d	1,96 c	1,84 a	2,22 b	1,86 c

Água I: 1 – Maio 01; 2 – Setembro 01; 3 – Setembro 02; Água II: 1 – Maio 03; 2 – Setembro 03; 3 – Setembro 04; Ini./Fim: 1 – Maio 01; 2 – Abril 05; 3 – Dezembro 05. Em cada coluna e para cada variável os valores com a mesma letra não são significativamente diferentes com $P \leq 0,05$.

Da análise do Quadro 7 verifica-se que o teste “F” foi significativo para os efeitos simples (Datas, Monólitos e Profundidade) nas 3 variáveis estudadas e para todos os ciclos de rega. Para o efeito da “Profundidade”, verifica-se contudo uma diminuição do grau de significância consoante a metodologia abordada para estudar as 3 variáveis, apresentando-se nalguns casos como não significativo ($CE_{Ini./Fim}$ e $ESP_{Água I}$). Nas interações, o teste “F” foi de um modo geral significativo, com excepção da maior parte das interações onde a variável “Profundidade” está envolvida.

No Quadro 8 encontram-se os resultados da comparação de médias (teste LSD), para um nível de significância de 5%.

A comparação de médias mostra, como seria de esperar, diferenças significativas entre “Datas” e entre “Monólitos”. Independente da metodologia utilizada (Água I, Água II ou Início/Fim), observa-se, em regra, um aumento das médias na última data analisada, embora, os valores finais nunca sejam problemáticos no que diz res-

peito à salinização e sodização do solo. Os valores finais mais altos obtidos foram de apenas 2,21 $dS\ m^{-1}$, 3,63 $(meq\ L^{-1})^{0,5}$ e 4,64% para as variáveis CE, SAR e ESP, respectivamente. Em relação aos monólitos ou tipo de rega utilizada, observa-se que os valores das 3 variáveis registados no monólito C, onde se aplicaram águas de pior qualidade, foram sempre os mais altos, enquanto que no monólito A, onde se aplicaram as águas de melhor qualidade, foram sempre os mais baixos. Em relação à “Profundidade” as diferenças observadas, independentemente do ciclo de rega, não são tão acentuadas, sendo em alguns casos, não significativas. Contudo, poder-se-á afirmar que os maiores valores de CE, SAR e ESP foram geralmente observados à superfície do solo.

Balanço de Sais

No Quadro 9 apresenta-se o balanço de sais em termos de cationes extraíveis Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} , para os 3 monólitos de solo, até 1 m de profundidade, considerando o

QUADRO 9. Balanço dos cátions extraíveis, até 1 m de profundidade, nos 3 monólitos.

Catião	Monólito	Q _{in}	Q _{rega}	Q _{fim}	Q _{acum}	Q _{lix}
Na ⁺ _{extraível}	A	64	78	187	123	+45
	B	64	240	217	153	-87
	C	64	604	336	272	-332
Mg ²⁺ _{extraível}	A	456	110	462	6	-103
	B	456	210	502	46	-164
	C	456	332	586	130	-202
Ca ²⁺ _{extraível}	A	1620	56	1623	3	-53
	B	1620	86	1676	56	-30
	C	1620	137	1718	98	-39

Quantidade inicial no solo (Q_{in}); Quantidade aplicada na rega (Q_{rega}); Quantidade final no solo (Q_{fim}); Quantidade acumulada no solo (Q_{acum}); Quantidade lixiviada (Q_{lix}).

período de Maio de 2001 a Dezembro de 2005.

Os resultados apresentados no Quadro 9 indicam uma acumulação de sódio de cerca de 2,5 vezes do valor inicial do solo no monólito B e cerca de 4 vezes no monólito C. Os resultados referentes ao monólito A estão certamente afectados de erro pois verificou-se uma acumulação de cerca de 45 g m⁻³ de solo superior à que foi aplicada com a rega. Este erro poderá ter ocorrido nas leituras laboratoriais das concentrações daquele catião devido aos seus baixos valores, nomeadamente nos dois primeiros anos do ensaio, em que a água de rega aplicada ao monólito A tinha uma condutividade de 0,3 dS m⁻¹. Verifica-se ainda uma lixiviação importante de Na⁺ no monólito C, o que confirma o papel relevante da chuva na lavagem dos sais. O balanço do magnésio e do cálcio é semelhante ao do sódio embora as quantidades acumuladas e lixiviadas sejam menores e concordantes com as aplicações daqueles cátions através da água de rega.

Características hidrodinâmicas do solo

Efectuou-se a medição das propriedades hidráulicas do solo no início (Maio 2001) e

no fim (Dezembro de 2005) dos ensaios nas 3 camadas que constituíam o perfil do solo. Na Figura 1 apresentam-se as curvas da retenção da água no solo e da condutividade hidráulica obtidas no fim do ensaio (Dezembro 2005) nos 3 monólitos para cada camada de solo.

As ligeiras diferenças observadas nas propriedades hidráulicas do solo no fim dos ensaios, em relação aos valores iniciais, não sugerem uma alteração física resultante da sodização do solo devido à rega com as águas salinas, nomeadamente no monólito C. Assim, para a curva de retenção da água no solo, verificaram-se pequenas variações entre o teor de água na saturação, associado à porosidade total do solo, para as diferentes profundidades dos 3 monólitos, por exemplo de 0,427 (solo inicial) para 0,403 e 0,446 cm³ cm⁻³, respectivamente para os monólitos B e C e profundidade de 0-48 cm, mantendo-se os declives das curvas muito semelhantes. Apenas para os monólitos A (85-170 cm), e B (48-85 cm) se verificaram as maiores alterações entre o teor de água na saturação e também do declive das curvas. As curvas da condutividade hidráulica são muito semelhantes tendo-se apenas verificado um ligeiro aumento da condutividade hidráulica saturada. Estas propriedades,

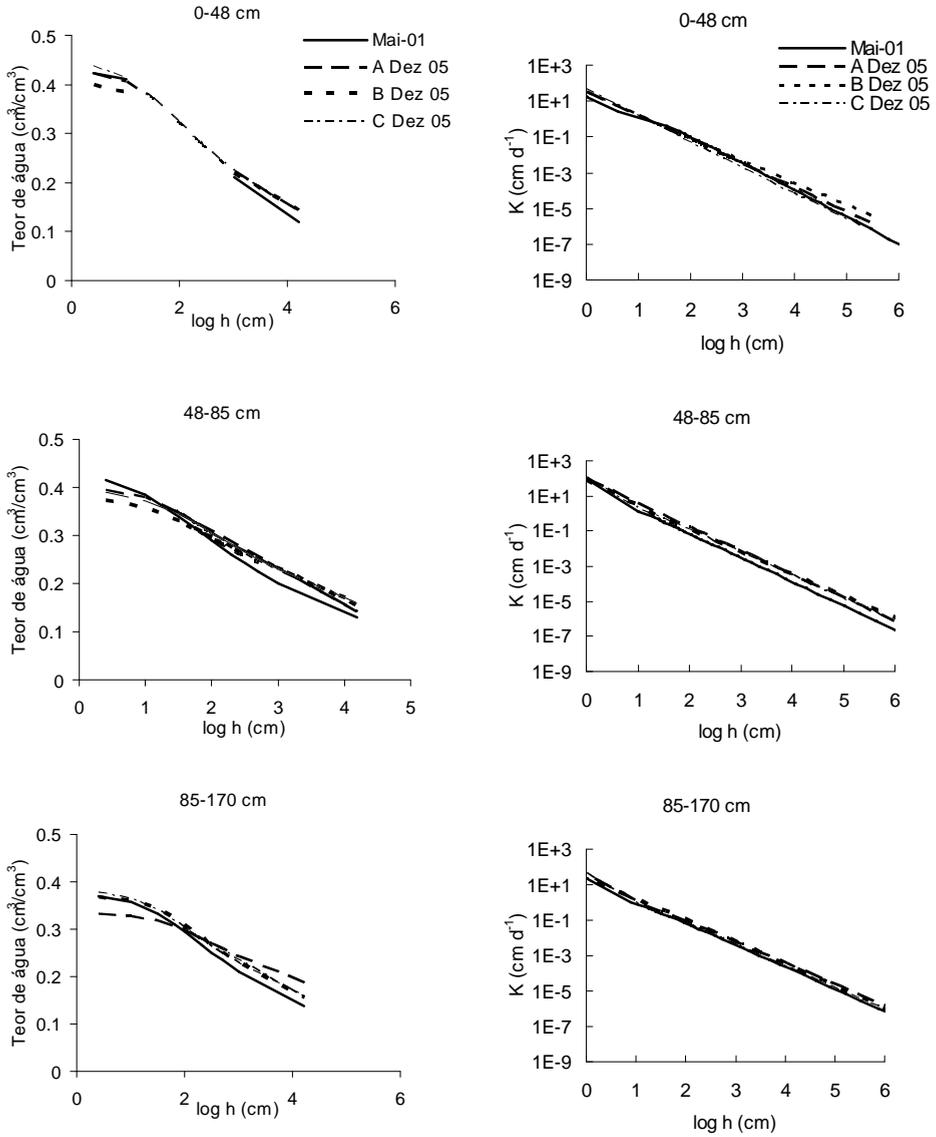


Figura 1. Curvas de retenção da água no solo e curvas da condutividade hidráulica no início (Maio de 2001) e no fim (Dezembro de 2005) dos ensaios nos 3 monólitos estudados.

especialmente a condutividade hidráulica, apresentam uma grande variabilidade espa-

cial, que deve neste caso justificar as pequenas diferenças observadas, uma vez que a

QUADRO 10. Estabilidade da microagregação do solo nos 3 monólitos no fim dos ensaios

Monólito	A			B			C		
	0-48	48-85	85-130	0-48	48-85	85-130	0-48	48-85	85-130
Prof. (cm)									
Alten (%)	8,4	11,7	9,9	8,4	6,3	9,1	12,8	12,3	9,1
Middleton(%)	40,8	49,5	52,4	46,4	39,5	49,6	53,7	58,8	44,0

colheita de amostras inicial foi efectuada em amostras no estado natural recolhidas num perfil que se situava numa zona adjacente à dos locais de instalação dos monólitos.

Estabilidade da microagregação

A estabilidade da microagregação foi avaliada nas amostras de terra (< 2mm) colhidas no final dos ensaios (Dezembro de 2005) nos 3 monólitos, com determinação dos índices de Alten (razão argila) e de Middleton ou razão limo+argila, que se indicam no Quadro 10.

A microestrutura do solo relativamente à camada superficial (0-48 cm) dos 3 monólitos classifica-se como muito estável para as partículas de diâmetro < 0,002 mm nos monólitos A e B mas apenas estável no caso do monólito C. Quanto à 2ª camada, a razão argila só é muito estável no monólito B e estável nos outros 2 monólitos. Relativamente à 3ª camada, a microestrutura é muito estável nos 3 monólitos (<10%).

Quanto à razão limo+argila (Middleton), a camada superficial bem como a 2ª camada do monólito C apresentam valores > 50%, ou seja a microestrutura é pouco estável, enquanto nos monólitos A e B é medianamente estável. Estes resultados indiciam que a água de rega de pior qualidade (3,2 dS m⁻¹) terá afectado negativamente a microestrutura do monólito C.

CONCLUSÕES

No Aluviossolo de textura mediana estudado, e considerando a precipitação total

ocorrida nos 5 anos do ensaio (1828 mm), a utilização de águas de rega até 3,2 dS m⁻¹ não conduziu à salinização/sodização do solo, embora no fim dos ciclos de rega a salinidade do solo aumentasse notoriamente nas camadas superficiais (0-40 cm), sendo lixiviados pela água das chuvas nos períodos inverniais. No final do ensaio, os valores da *CE* do solo, embora superiores aos iniciais, não ultrapassaram 1 e 2 dS m⁻¹, respectivamente para as profundidades de 0-40 e de 40-100 cm. Os valores do *SAR* e do *ESP* aumentaram com a regas, mais decisivamente até aos 40 cm, não sendo tão evidente como no caso da *CE* o efeito da lavagem pela chuva. No caso do *SAR* foram atingidos valores, na camada superficial (0-20 cm) e no final do ensaio, de 3, 4 e 7 (monólitos A, B e C) que representam um aumento de 4, 5 e 9 vezes em relação aos valores iniciais. Os valores do *ESP*, para aquela mesma camada, foram reduzidos de 8 para 6% nas condições mais desfavoráveis (monólito C). De qualquer forma, os valores de *ESP* obtidos não implicam riscos imediatos de sodização do solo. A análise estatística efectuada revelou estas mesmas tendências.

O balanço dos sais indicou uma acumulação de sódio, certamente no complexo de troca do solo, de cerca de 2,5 e 4 vezes nos monólitos B e C. No monólito C ocorreu uma lixiviação importante daquele catião. No caso do Mg²⁺ e Ca²⁺ o balanço seguiu o comportamento do Na⁺, embora as quantidades acumuladas e lixiviadas sejam menores e concordantes com as respectivas aplicações através da rega.

As propriedades hidráulicas do solo apre-

sentaram um comportamento muito semelhante no fim e início do ensaio. As pequenas variações observadas devem-se provavelmente à variação espacial daquelas propriedades.

A estabilidade da microestrutura do solo da camada de 0-20 cm revelou-se muito estável nos monólitos A e B, mas apenas estável no monólito C. Na 2ª camada de solo, a razão argila só é muito estável no monólito B e estável nos outros 2 monólitos. Relativamente à profundidade de 85 a 130 cm, a microestrutura é muito estável nos 3 monólitos.

É de referir que o solo estudado apresentava características hidráulicas favoráveis, com valores da condutividade hidráulica saturada de cerca de 18 (0-48 cm) e 99 cm/dia (48-85 cm). Uma vez que os valores finais da CE, SAR e ESP foram superiores aos valores determinados inicialmente, a tendência verificada para o agravamento da salinidade abaixo dos 40 cm e da sodicidade até cerca dos 60/70 cm constitui uma preocupação a ter em conta quando se procede à aplicação continuada de água de rega de menor qualidade, nomeadamente em novas áreas de regadio e especialmente quando ocorrem anos secos (precipitação escassa no Outono-Inverno) e em solos que apresentem uma cinética mais lenta.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi efectuado no âmbito dos Projectos PIDDAC 150/00 e AGRO 727.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvim, A. 1980. *Qualidade da água e riscos de salinização do solo nos perímetros de Campilhas e do Roxo*. Congresso 80, Ordem dos Engenheiros, 23 a 29 Março, Coimbra.
- Alvim, A & Nunes, J. 1984. *Qualidade da Água de Rega e Risco de Halomorfização do Solo nos Perímetros de Rega do Sul de Portugal (1980 a 1982)*. Ministério da Agricultura, Florestas e Alimentação. Direcção Geral de Hidráulica e Engenharia Agrícola, Lisboa.
- Gonçalves, M. C., Martins, J. C., Oliveira, A., Pires, F. P., Gonçalves, A. R., Bica, J. & Bica, M. 2004. Estudo preliminar sobre a evolução da salinização e da sodicização de um Aluviossolo regado com águas de diferentes qualidades, em Alvalade-Sado (Alentejo). *Revista de Ciências Agrárias*, Vol. XXVII (1): 113-126.
- Gonçalves, M. C., Martins, J. C., Neves, M. J., Pires, F. P., Oliveira, A., Bica, J. & Bica, M. 2005. Impacto da qualidade da água de rega no solo. Estudo da salinização e da sodicização de um Aluviossolo, em Alvalade-Sado, Alentejo. *Revista de Ciências Agrárias*, vol. XXVIII (2): 177-188.
- Greene, R. S. B., Posner, A. M. & Quirk, J. P. 1978. A study of the coagulation of montmorillonite and illite suspensions by CaCl_2 using the electron microscope. In W. W. Emerson, R. D. Bond and A. R. Dexter (ed.). *Modification of soil structure*: 35-40. John Wiley and Sons, New York.
- Keren, R. 2000. Salinity. In M. E. Sumner (ed). *Handbook of Soil Science*, pp. G3-G25. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Martins, J. C., Gonçalves, M. C., Gonçalves, A. R., Rodrigues, C. P., Pires, F. P. & Oliveira, A. 2001. Qualidade da água de rega e riscos de salinização e de alcalização de solos do Alentejo. *Revista de Ciências Agrárias*, XXIV (3 e 4): 324-336.

- Martins, J. C., Gonçalves, M. C., Pires, F. P., Oliveira, A. V., Gonçalves, A. R., & Rodrigues, C. P. 2004. Salinização de um Fluvissoilo regado com águas de qualidade diferente, em condições de estufa e de campo. *Revista de Ciências Agrárias*, **Vol. XXVII (1)**: 72-85.
- Mesquita, M. E. & Alvim, A. 1981. Testagem de um método de determinação da capacidade de troca catiónica em solos salinos. *Pedologia* **16 (1)**: 165-176.
- Oliveira, I. & Varela, M. 2005. A qualidade da água dos pequenos regadios individuais do Alentejo. *Actas do I Congresso Nacional de Rega e Drenagem*. 5 a 8 de Dezembro, Beja. (CD-ROM)
- Sequeira, E., Gomes, M. P., Silva, A. S., Silva, J. M. Vieira., Martins, J. C., Gonçalves, M. C., Pires, F. P., Barreiros, F., Oliveira, A., Varela, J., Vicente, J., Nunes, M., Rodrigues, M. J., Rodrigues, C., Cravo, M. L., Azinhais, F., Pires, S. & Louro A. 1994. *Estudo de Impacte Ambiental do Empreendimento de Alqueva. Área: Solos*. Departamento de Pedologia, Estação Agronómica Nacional, Oeiras.
- Silva, A. A., Alvim, A & Santos, M. J. 1975. Métodos de Análise de Solos, Plantas e Águas. *Pedologia* **10 (3)**: 133-146.