

# RELACÕES ENTRE AS PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DE UM SOLO IRRIGADO COM EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO

THOMAS.V. GLOAGUEN<sup>1</sup>, ROBERTA.A.B.GONÇALVES<sup>2</sup>, MARCOS. V. FOLEGATTI<sup>3</sup>,  
CÉLIA.R. MONTES<sup>4</sup>, YVES. LUCAS<sup>5</sup>, PAULO.L. LIBARDI<sup>6</sup>, ADOLFO. J. MELFI<sup>7</sup>, CÉLIA.R.F.  
FAGANELLO<sup>8</sup>

Escrito para apresentação no  
XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola  
31 de julho a 4 de agosto de 2006 – João Pessoa - PB

## RESUMO:

A irrigação com efluente de esgoto tratado (EET) pode ser considerada uma alternativa interessante diante da iminente escassez dos recursos hídricos. Nesse experimento, um latossolo cultivado com milho e girassol foi irrigado durante dois anos com EET. No final, foram analisadas algumas propriedades físicas (condutividade hidráulica saturada- $K_s$ , cripto-, micro- e macroporosidade, argila dispersa em água-ADA) e algumas propriedades químicas ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , acidez potencial). A análise de correlação revelou a dificuldade e o cuidado necessário na interpretação destes resultados. Assim, o  $Na^+$ , apesar deste íon ser apontado como responsável da alteração das propriedades físicas do solo, apresentou baixas correlações com estas, devido à sua grande mobilidade no solo. Por outro lado, identificou uma falsa correlação entre  $Ca^{2+}$  e  $K_s$ . Correlações entre umidade, porosidade, ADA,  $Na^+$ ,  $K^+$  confirmaram a ocorrência de fenômenos de dispersão e expansão dos agregados e uma forte competição entre  $Na^+$  e  $K^+$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** Efluente, porosidade do solo, sodicidade

## RELATIONSHIP BETWEEN CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF A SOIL IRRIGATED WITH TREATED SEWAGE EFFLUENT

### ABSTRACT:

Irrigation with treated sewage effluent (TSE) can be considered as a valuable alternative before the imminent scarcity of the water resources. In this experiment, an oxisol cultivated with corn and sunflower was irrigated during two years with TSE. At the end, some physical properties (saturated hydraulic conductivity- $K_s$ , crypto-, micro- and macroporosity, water dispersed clay-WDC) and some chemical properties ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , potential acidity) were determined. The correlation analysis reveals the difficulty and the care needed for interpreting these results. Thus, the  $Na^+$ , although this ion is known as responsible for alteration in soil physical properties, presented low correlation with them, due to its high mobility in soil. On the opposite, a false correlation between  $Ca^{2+}$  and  $K_s$  was identified. Correlations among water content, porosity, WDC,  $Na^+$  and  $K^+$  confirmed the presence of phenomena of aggregates dispersion/expansion and high competition between  $Na^+$  and  $K^+$ .

**KEYWORDS:** Effluent, soil porosity, sodicity

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup> geólogo, Doutor em Geociências NUPEGEL/IGc/USP. Pós-doutorando pela UFRB, Cruz das Almas-BA, (71)36215540, e-mail: gloaguen@usp.br

<sup>2</sup> Eng<sup>a</sup> agrícola, Doutora em Irrigação e Drenagem, ESALQ/USP. Pós-Doutoranda pela UFBA, Cruz das Almas-BA.

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> agrônomo, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia Rural e Solos, ESALQ/USP, Piracicaba-SP.

<sup>4</sup> Física, Prof. Doutora, Depto. de Nutrição de Solo, NUPEGEL/ESALQ/USP, Piracicaba-SP.

<sup>5</sup> Eng<sup>o</sup> agrônomo, Prof. Doutor, Depto. de Química, Université du Sud Toulon-Var, Toulon, França.

<sup>6</sup> Eng<sup>o</sup> agrônomo, Depto. de Ciências Exatas, ESALQ/USP, Piracicaba-SP.

<sup>7</sup> Eng<sup>o</sup> geólogo, Prof. Doutor, Depto. de Nutrição de Solo, NUPEGEL/ESALQ/USP, Piracicaba-SP.

<sup>8</sup> Eng<sup>a</sup> agrônomo, Doutoranda em Ecologia de Agroecossistemas, ESALQ/USP, Piracicaba-SP.

**INTRODUÇÃO:** O uso agrícola de efluente de esgoto tratado (EET) tem sido cada vez considerado, pois ele permite responder simultaneamente a dois grandes problemas ligados ao nosso ambiente: a demanda sempre crescente da agricultura irrigada e a legislação hoje estrita em termos de despejo de águas residuárias nos corpos d'água. Os principais trabalhos sobre este tema dizem respeito à avaliação do impacto ambiental desse tipo de irrigação, e abrangem de três tipos de estudos: (i) estudo das alterações das propriedades químicas do solo (Jnad et al., 2001a; Gloaguen, 2006), (ii) estudo das alterações das propriedades físicas do solo (Balks et al., 1998; Jnad et al., 2001b; Gonçalves, 2005), e, (iii) estudo do impacto na nutrição das plantas (Rattan et al., 2005; Fonseca, 2005). Em termos de química do solo, o maior problema encontrado vem da sodificação do solo, a qual perturba o próprio estado nutricional das plantas através da alteração da distribuição de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  no complexo de troca catiônica do solo. O impacto negativo da irrigação com EET na física do solo foi também frequentemente mencionado, relativo à dispersão das argilas e ao decréscimo da condutividade hidráulica (Gonçalves, 2005), provocando decréscimo dos fluxos e aumento da retenção de água no solo (Gloaguen, 2006). Vários autores observaram uma relação direta entre a alteração das propriedades físicas e o grau de sodicidade da água de irrigação (Balks et al., 1998; Bagarello et al., 2005), porém, os estudos são geralmente restritos ao impacto do sódio. O presente trabalho expõe as relações de causa a efeito entre as principais propriedades do solo alteradas durante dois anos de irrigação com efluente.

**METODOLOGIA:** Os trabalhos de campo foram realizados no município de Lins (SP), onde o solo foi classificado como latossolo vermelho distrófico típico. O estudo foi desenvolvido nos anos de 2002 e 2003, quando se irrigou por gotejamento 4 ciclos de cultura, dois de milho e dois de girassol, rotacionados. A parcela E foi irrigada com efluente de esgoto doméstico tratado através de lagoa de estabilização; a parcela A foi irrigada com água de abastecimento da cidade e a parcela T correspondeu a uma área não irrigada e não cultivada. As curvas de retenção, construídas para potencial mátrico ( $h$ ) de 0,1 a 150 m.c.a., foram determinadas no laboratório em amostras não deformadas (3 repetições) nas profundidades de 0,125 a 0,375 m a cada 0,25 m, e baseadas no modelo de Van Genuchten. O raio equivalente dos poros ( $r$  em m.c.a.) foi calculado pela equação de Jurin,  $r = -2\sigma \cdot \cos \alpha / \rho g h$ , onde  $\sigma$  = tensão superficial ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $\alpha$  = ângulo de contato ( $^\circ$ ),  $\rho$  = densidade da água ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ). A porosidade foi dividida em três classes de poros em função do diâmetro: criptoporosidade (volumes de poros com  $2 \cdot r < 0,0002$  mm), microporosidade (volumes de poros com  $0,0002 < 2 \cdot r < 0,05$  mm) e macroporosidade (volumes de poros com  $2 \cdot r > 0,05$  mm). A umidade volumétrica à capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) foi obtida a partir do método do ponto de inflexão da curva  $h(\theta)$ . A determinação da argila dispersa em água (ADA) foi feita através do método da pipeta em amostras coletadas nos mesmos pontos. Cilindros não deformados foram amostrados nas três parcelas e 8 profundidades para determinação da condutividade hidráulica saturada pelo método do permeametro da carga decrescente. Em seguida, análises químicas foram realizadas nestas amostras. A acidez potencial (H+Al) foi determinada em solução de acetato de cálcio  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (pH=7) e titulação com NaOH  $0,025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . A determinação do sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) trocáveis foi realizada por extrato de cloreto de amônio  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . O  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  foram analisados por fotometria de emissão atômica e o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$  por espectroscopia de absorção atômica. Foram calculados coeficientes de correlação de Pearson entre os parâmetros estudados. Mais detalhes sobre a metodologia são disponíveis em Gonçalves (2005).

**RESULTADOS E DISCUSSÕES:** Os resultados relativos às alterações das propriedades químicas e físicas das amostras estudadas são discutidos detalhadamente em Gonçalves (2005). A autora observou um decréscimo da microporosidade enquanto aumentou o volume de criptoporos nas parcelas irrigada tanto com efluente como com água sódica. Notou também um decréscimo da condutividade hidráulica saturada. Em relações as propriedades químicas, as principais alterações químicas disseram respeito ao par  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ . Evidenciou uma competição entre  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , resultando num aumento das razões  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  que passaram de uma faixa de 0,25-0,31 (parcela T) a uma faixa de 4-25 (A) e 4-24 (E). A soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação por bases mostraram valores maiores após irrigação, principalmente devido à presença de  $\text{Na}^+$ , mas as diferenças foram

poucas vezes comprovadas pelos testes estatísticos. O coeficiente de correlação entre  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  foi significativo e negativo (-0,572), confirmando a troca entre os dois elementos na CTC do solo (Tabela 1). O  $\text{Na}^+$  foi também muito bem correlacionado com SB, CTC e V (coeficiente > 0,60;  $p < 0,01$ ), o que indica o efeito importante do  $\text{Na}^+$  na saturação do solo por bases. No entanto, o efeito do  $\text{Ca}^{2+}$  ainda é preponderante, como mostram as melhores correlações de SB, CTC e V com  $\text{Ca}^{2+}$  do que com  $\text{Na}^+$ .

Tabela 1 – Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis físicas e químicas. SB=soma das bases; CTC=capacidade de troca catiônica; V=percentual de saturação por base; ADA=argila dispersa em água;  $\theta_R$ =umidade residual;  $\theta_S$ =umidade à saturação;  $\theta_{CC}$ =umidade à capacidade de campo;  $d_S$ =densidade do solo;  $V_S$ =volume de sólidos;  $V_{MA}$ =volume de macroporos;  $V_{MI}$ =volume de microporos;  $V_{CRI}$ =volume de criptoporos

	Al+H	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	SB	CTC	V	$K_S$
Al+H	1,00								
$\text{Na}^+$	-0,12	1,00							
$\text{K}^+$	-0,15	-0,57*	1,00						
$\text{Ca}^{2+}$	-0,14	0,29	0,02	1,00					
$\text{Mg}^{2+}$	-0,02	0,23	-0,05	0,81*	1,00				
SB	-0,18	0,77*	-0,20	0,8*	0,70*	1,00			
CTC	0,17	0,73*	-0,26	0,75*	0,70*	0,94*	1,00		
V	-0,60*	0,61*	0,02	0,69*	0,56*	0,85*	0,64*	1,00	
$K_S$	-0,11	-0,22	0,31	-0,59*	-0,72*	-0,49*	-0,53*	-0,28	1,00
ADA	-0,06	0,35	-0,43*	0,14	0,18	0,25	0,23	0,22	-0,25
$\theta_R$	0,00	0,56*	-0,69*	0,05	0,16	0,31	0,31	0,23	-0,25
$\theta_S$	-0,10	0,08	-0,18	-0,25	-0,19	-0,13	-0,16	-0,11	0,20
$\theta_{CC}$	-0,06	0,49*	-0,72*	-0,08	-0,01	0,16	0,14	0,09	-0,09
$d_A$	0,13	0,03	0,05	0,25	0,18	0,17	0,22	0,14	-0,16
$V_S$	0,10	-0,11	0,23	0,25	0,18	0,11	0,15	0,09	-0,18
$V_{MA}$	-0,06	-0,03	-0,07	-0,20	-0,13	-0,15	-0,17	-0,14	0,08
$V_{MI}$	-0,06	-0,38*	0,46*	-0,12	-0,22	-0,27	-0,29	-0,18	0,37*
$V_{cri}$	0,00	0,56*	-0,70*	0,03	0,14	0,30	0,30	0,21	-0,25

  

	ADA	$\theta_R$	$\theta_S$	$\theta_{CC}$	$d_A$	$V_S$	$V_{MA}$	$V_{MI}$	$V_{CRI}$
ADA	1,00								
$\theta_R$	0,62*	1,00							
$\theta_S$	-0,37*	-0,18	1,00						
$\theta_{CC}$	0,31	0,52*	0,58*	1,00					
$d_A$	0,38*	0,27	-0,93*	-0,42*	1,00				
$V_S$	0,32	0,13	-0,99*	-0,61*	0,91*	1,00			
$V_{MA}$	-0,21	-0,36	0,80*	0,36*	-0,85*	-0,81*	1,00		
$V_{MI}$	-0,76*	-0,77*	0,54*	-0,15	-0,47*	-0,5*	0,32	1,00	
$V_{cri}$	0,63*	0,99*	-0,14	0,55*	0,23	0,10	-0,32	-0,77*	1,00

Ao inverso do esperado, a condutividade hidráulica do solo saturado  $K_{sat}$  não foi correlacionada com o conteúdo de  $\text{Na}^+$  no solo (-0,22). Por outro lado, identificaram-se correlações de  $K_{sat}$  com os cátions bivalentes  $\text{Ca}^{2+}$  (-0,59) e  $\text{Mg}^{2+}$  (-0,72), o que mostra, diferentemente dos estudos encontrados sobre irrigação com efluente, a maior dependência de  $K_{sat}$  com os íons bivalentes do que com o  $\text{Na}^+$  ou com outros parâmetros físicos (volume de macroporos). Os conteúdos de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram maiores na superfície do solo, devido à retenção pela CTC do solo dos íons aplicados através da adubação e do efluente. Por outro lado, foi observado aumento sistemático de  $K_{sat}$  com a profundidade nas parcelas E, A e T, devido à compactação na superfície do solo, o que explica as correlações negativas identificadas com  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . Isso evidencia o cuidado ao interpretar esse tipo de correlações. Em relação à estrutura do solo, a porcentagem de argila dispersa (ADA) foi correlacionada negativamente com o volume de microporos (-0,76), e positivamente com o volume de criptoporos (0,63). O  $\text{Na}^+$  mostra correlações similares com os volumes de poros e apresenta uma leve correlação com ADA

(0,35;  $p < 0,05$ ). Isso corrobora com a hipótese dos fenômenos de dispersão/expansão dos agregados provocados pelo  $\text{Na}^+$  (Summer, 1993): aumento do volume de criptoporos enquanto o volume de poros de diâmetros entre 0,2 e 50  $\mu\text{m}$  (microporosidade). A macroporosidade não foi afetada pela química do solo. Da mesma forma, nenhuma correlação entre a porosidade e  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , CTC ou SB foi observada. É interessante observar que as correlações dos volumes de poros com o  $\text{K}^+$  são similares às correlações com o  $\text{Na}^+$ , mas com sinal inverso (correlação positiva com  $V_{\text{MI}}$  e negativa com  $V_{\text{CRI}}$ ). As umidades residuais e à capacidade de campo foram relacionadas ao  $V_{\text{CRI}}$ : o seu aumento explica o aumento de  $\theta_{\text{R}}$  e  $\theta_{\text{CC}}$ . Nota-se que o próprio método de determinação de  $\theta_{\text{R}}$ ,  $\theta_{\text{S}}$ ,  $V_{\text{MA}}$ , e  $V_{\text{CRI}}$  explica as correlações altas entre  $\theta_{\text{R}}$  e  $V_{\text{CRI}}$  (0,99) e entre  $\theta_{\text{S}}$  e  $V_{\text{MA}}$  (0,80). Houve correlação também entre  $\text{Na}^+$  e  $\theta_{\text{CC}}$  e  $\theta_{\text{R}}$  confirmando o efeito do  $\text{Na}^+$  na capacidade de retenção de água no solo. Pôde-se verificar também a correlação entre densidade do solo e ADA, confirmando o fato de que a dispersão de argila pode interferir na compactação do solo.

**CONCLUSÕES:** Esta análise de correlação revelou que o  $\text{Na}^+$  foi responsável pelo decréscimo da microporosidade e aumento da criptoporosidade, ou seja, os parâmetros associados à estrutura do solo. No entanto, a fácil lixiviação do  $\text{Na}^+$  atenuou estas correlações, ao contrário do  $\text{K}^+$ , que foi diretamente afetado pelo  $\text{Na}^+$  (competição entre os dois íons), e que apresentou maiores correlações com propriedades físicas. Os parâmetros mais ligados à textura do solo, tais como volumes de sólidos e de macroporos e densidade do solo não foram influenciados pela química do solo. Os conteúdos de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , a CTC, SB e V, embora terem sido correlacionados com  $\text{Na}^+$ , não mostraram correlação com a física do solo.

## REFERÊNCIAS

- JNAD, I.; LESIKAR, B.; KENIMER, A.; SABBAGH, G. (2001a) Subsurface drip dispersal of residential effluent: I. Soil Chemical Characteristics. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 44(5), 1149-1157.
- JNAD, I.; LESIKAR, B.; KENIMER, A.; SABBAGH, G. (2001b) Subsurface drip dispersal of residential effluent: II. Soil hydraulic characteristics. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 44(5), 1159-1165.
- BALKS M.R.; BOND, W.J.; SMITH, C.J. (1998) Effects of sodium accumulation on soil physical properties under an effluent-irrigated plantation. Australian Journal of Soil Research, 36, 821-830.
- FONSECA, A.F. (2005) Viabilidade agrônomo-ambiental da disposição de efluente de esgoto tratado em um sistema solo-pastagem. Piracicaba, 174 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- GONÇALVES, R.A.B. (2005) Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado nas propriedades físico-hídricas de um latossolo. Piracicaba, 119 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- GLOAGUEN, T.V. (2006) Transferências de espécies químicas através de um solo cultivado com milho e girassol e fertirrigado com efluente de esgoto tratado. São Paulo, 113 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; PALAZZOLO, E.; PANNO, M.; REYNOLDS, W.D. (2006) Field and laboratory approaches for determining sodicity effects on saturated soil hydraulic conductivity. Geoderma, 130 (1-2), 1-13.
- RATTAN, R.K.; DATTA, S.P.; CHHONKAR, P.K.; SURIBABU, K.; SINGH, A.K. (2005) Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study. Agriculture, Ecosystems and Environment, 109, 310-322