

**SIMULAÇÃO DO RISCO DE LIXIVIAÇÃO DE POLUENTES
ORGÂNICOS DE LODOS**

Lourival Costa Paraíba¹; Karen Kataguiiri² & Sônia Cláudia Nascimento de Queiroz³

Resumo - O objetivo desse trabalho foi simular o risco de lixiviação de trinta e oito poluentes orgânicos presentes em lodos de esgotos provenientes de estações de tratamentos. Para tanto, foi assumido um cultivo hipotético de milho em um solo Latossolo vermelho distrófico, característico de solos de regiões produtoras de milho, no qual foi aplicada uma dose de lodo de esgoto como fertilizante. Lodos de esgotos são ricos em matéria orgânica e micronutrientes úteis na fertilização de solos para a produção de plantas, mas também podem conter poluentes de importância ambiental. A lixiviação dos poluentes foi simulada utilizando-se o modelo CMLS94 e os dados climáticos de mil anos independentes e igualmente prováveis gerados pelo simulador de clima WGEN, a partir de uma seqüência de quatorze anos consecutivos observados e registrados pela Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Campinas. A análise de risco de lixiviação indicou que os poluentes benzidina > n-nitrosodi-n-propilamina > fenol > 2,4-dinitrofenol > isoforano > nitrobenzeno > p-cresol > o-cresol > m-cresol > 2-clorofenol, nessa ordem, devem ser monitorados em águas subterrâneas de regiões de solos nos quais foram aplicados doses de lodo.

Palavras-chave: simulação; lixiviação; CMLS94.

Abstract - The objective of this study was to simulate the leaching risk of thirty eight organic pollutants present in sludges coming from urban wastewater treatment stations. Thereby, a hypothetical corn crop was assumed in a dystrophic red latossol area, characteristic of corn culture producing areas' soils in which a dose of sludge was applied as fertilizer. Sewage sludges are rich in organic matter and micronutrients useful in soil fertilization for cultivated plants production, but it can also contains environmentally important pollutants. It was supposed sludge containing thirty eight types of environmentally important organic pollutants. The pollutants leaching was simulated using the CMLS94 model and climatic data of an aleatory chosen year among climatic data of a thousand independent and equally probable years generated by the climate simulator WGEN, build

¹Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente. CP. 69; CEP 13820-000, Tel. 19-3311-2667; Fax. 19-3311-2740; Jaguariúna, São Paulo, Brasil. e-mail: lourival@cnpma.embrapa.br; ²Bolsista PIBIC/Embrapa. Faculdade de Engenharia Ambiental; UNESP - Campus Experimental Sorocaba; São Paulo; Brasil. e-mail: karen.kataguiiri@terra.com.br; ³Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente. CP. 69; CEP 13820-000, Tel. 19-3311-2687; Fax. 19-3311-2740; Jaguariúna, São Paulo, Brasil. e-mail: sonia@cnpma.embrapa.br;

on from a consecutive fourteen years, registered by the Experimental Station of the Agronomic Institute of Campinas. The leaching risk analysis indicated that the pollutants benzidene, n-nitrosodi-n-propylamine, phenol, 2,4-dinitrophenol, isophorone, nitrobenzene, p-cresol, o-cresol, m-cresol, and 2-chlorophenol, in this order, should be monitored in groundwater of soil areas in which sludge doses were applied for plants production.

1. INTRODUÇÃO

Uma das conseqüências do crescimento demográfico é o aumento progressivo do volume de esgoto produzido pelos aglomerados humanos. O descarte desse esgoto em corpos de água superficial constitui um importante problema ambiental, uma vez que essa prática tem contribuído sobremaneira para a degradação da qualidade das reservas naturais de água. Algumas poucas cidades brasileiras tratam os seus dejetos em estações de tratamento de esgotos, mas a maioria delas costuma desaguar seus esgotos em mananciais de água superficial ou em fossas sépticas.

O tratamento de esgotos por estações de tratamentos tem por objetivo remover organismos patogênicos e parte significativa da matéria sólida contida nos esgotos. O lodo resultante do tratamento do esgoto pode conter poluentes orgânicos de diversas naturezas tais como detergentes, inseticidas e metais pesados (Sobrinho, 2001). Segundo Tsutiya (2001), os lodos produzidos pelas estações de tratamentos de esgotos das cidades de Barueri e de Suzano, ambas no Estado de São Paulo, contêm poluentes orgânicos de importância ambiental.

O lodo é um material de composição predominantemente orgânica que, sob estrito controle de qualidade, pode ser usado para melhorar a qualidade de solos agrícolas (Bettiol e Santos, 2001). O conhecimento público do conteúdo de substâncias inorgânicas e orgânicas e de organismos patogênicos contidos em lodos permite avaliar o risco de contaminação alimentar e ambiental decorrente da utilização de lodos como fertilizantes agrícolas. Por exemplo, pode-se estimar o risco de lixiviação e de contaminação de águas subterrâneas, por um determinado poluente orgânico contido em lodo que venha a ser usado como fertilizante agrícola.

O objetivo desse trabalho foi simular o risco de lixiviação de trinta e oito poluentes orgânicos presentes em lodos de esgotos, provenientes de estações de tratamentos de esgotos urbanos, e identificar quais desses poluentes devem ser prioritariamente monitorados em amostras de águas subterrâneas de regiões ou de localidades nas quais são utilizados lodos como fertilizantes de cultivos agrícolas. Para tanto, foi assumido um cultivo hipotético de milho em um solo Latossolo vermelho distrófico, característico de solos de regiões brasileiras produtoras de milho, no qual foi aplicada como fertilizante uma dose de lodo contendo concentrações significativas dos trinta e oito poluentes selecionados.

O simulador CMLS94 de Nofziger e Hornsby (1994) foi utilizado para estimar o risco de contaminação das águas subterrâneas pelos poluentes. Mil anos de dados climáticos igualmente prováveis e independentes foram gerados pelo simulador de clima WGEN (Richardson e Wright, 1984). Os dados climáticos gerados, para cada ano, foram utilizados pelo CMLS94 para simular a lixiviação de cada poluente. A lixiviação foi considerada significativa quando na simulação o poluente ultrapassou a zona de raiz das plantas de milho, localizada entre 0,0 e 0,60 m do perfil do solo, cento e vinte dias após a aplicação do lodo como fertilizante. Para cada poluente foi calculado o risco de lixiviação. Os poluentes que apresentaram os maiores riscos de lixiviação foram classificados como poluentes prioritários para monitoramento em águas subterrâneas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O simulador CMLS94 é um modelo de transporte unidimensional de solutos que usa o princípio do fluxo por pistão para simular o movimento vertical do composto no horizonte radicular do solo. Nesse modelo, a zona de raiz do solo é subdividida em camadas na qual o soluto se desloca verticalmente, como consequência do balanço hídrico, e se dissipa como resultado da sorção e da degradação em cada camada. Embora o CMLS94 tenha sido descrito primeiramente como uma ferramenta educacional e de gerenciamento, ele foi testado em diversos tipos de solos e de climas, e aprovado favoravelmente para simular o transporte no solo de inúmeras substâncias químicas (Wilson et al., 1996).

O WGEN é um gerador de clima que permite simular valores diários de precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, e radiação solar com as mesmas características estatísticas de valores diários históricos de um determinado período e localidade. O WGEN foi embutido por Nofziger e Hornsby (1994) no CMLS94 e adaptado para simular dados climáticos para o CMLS94 produzir distribuições de probabilidade de lixiviação, entre outros recursos. O WGEN PAR é um acessório do WGEN que permite gerar, a partir de dados históricos, parâmetros climáticos necessários para o WGEN produzir dados climáticos independentes e igualmente prováveis e que são úteis para simular a probabilidade de uma substância ultrapassar uma determinada profundidade do solo em um intervalo de tempo previamente estabelecido.

Os dados diários de precipitação e de temperatura do ar de quatorze anos consecutivos (1993 - 2007) da região de Campinas, coletados pela Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Campinas, foram utilizados pelo WGEN PAR para gerar os parâmetros necessários para o WGEN, no CMLS94, produzir uma seqüência de mil anos independentes e igualmente prováveis aos anos do período de 1993 a 2007.

Os dados de solo utilizados pelo CMLS94 para simular a lixiviação dos poluentes foram obtidos do projeto *“Avaliação da translocação de alguns contaminantes orgânicos presentes no*

lodo de esgoto, para o produto agrícola, visando à segurança do alimento: milho”, desenvolvido na Embrapa Meio Ambiente. Esse projeto foi conduzido no campo experimental da Embrapa Meio Ambiente, em uma área de Latossolo vermelho distrófico, cujas características estão apresentadas na Tabela 1. Nesta tabela, para cada horizonte, são mostradas as características do solo necessárias para o CMLS94 simular a lixiviação dos poluentes, onde CO é o conteúdo volumétrico de carbono orgânico, DS é a densidade total e CC, PM e PS são os conteúdos volumétricos de água na capacidade de campo, no ponto de murcha e no ponto de saturação, respectivamente.

Tabela 1. Características do perfil de Latossolo vermelho distrófico utilizadas na simulação da lixiviação pelo CMLS94 dos poluentes dos lodos de esgotos.

Profundidade (cm)	CO (g kg ⁻¹)	DS (kg dm ⁻³)	CC (m ³ m ⁻³)	PM (kg kg ⁻¹)	PS (m ³ m ⁻³)
0 – 10	16,0	1,25	0,31	0,15	0,54
10 – 20	14,0	1,25	0,28	0,14	0,53
20 – 30	13,0	1,24	0,30	0,13	0,52
30 – 40	12,0	1,20	0,29	0,18	0,57
40 – 50	12,0	1,18	0,30	0,11	0,58
50 – 60	11,0	1,23	0,32	0,11	0,51
60 – 70	11,0	1,21	0,32	0,21	0,57
70 – 80	10,0	1,18	0,31	0,13	0,56
80 – 100	10,0	1,22	0,29	0,20	0,51
100 – 120	9,0	1,18	0,32	0,21	0,56

CO = carbono orgânico; DS = densidade do solo; CC = conteúdo volumétrico de água para capacidade de campo; PM = conteúdo gravimétrico para o ponto de murcha permanente; PS = ponto de saturação.

Para simular a evapotranspiração das plantas de milho no balance hídrico de água no perfil do solo, o CMLS94 requer valores dos coeficientes de cultivo da planta de milho (K_C) de cada fase de crescimento do cultivo. Na Tabela 2, são mostrados os valores de K_C do milho fornecidos ao CMLS94 para estimar a lixiviação dos poluentes em um cultivo de milho.

Tabela 2. Coeficiente de cultura (K_C) de milho	
Dias após a semeadura	K_C
1	0,35
20	0,35
55	1,14
95	1,14
125	0,60

A Tabela 3 apresenta os trinta e oito poluentes orgânicos selecionados para simular o risco de lixiviação. Esses poluentes ou foram encontrados em amostras de lodos urbanos brasileiros, ou são poluentes recomendados por agências reguladoras para monitoramento, pela sua importância ambiental e para a saúde humana (EPA, 1985; Tsutiya, 2001). De cada poluente, o CMLS94 necessita do coeficiente de sorção no solo, K_{OC} (L kg⁻¹), e da meia-vida de degradação no solo, $t_{1/2}$

(dias). Foi suposto que a aplicação do lodo proporcionou uma concentração inicial de $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$ de cada poluente na superfície do solo. Os dados de sorção e meia-vida de cada poluente estão apresentados na Tabela 3. Foi suposto que o lodo foi aplicado na superfície do solo no dia 13 de dezembro de 2006 e o plantio do milho foi realizado no dia 18 de dezembro de 2006.

Tabela 3. Poluentes orgânicos, registro CAS, coeficiente de sorção, meia vida no solo e risco de lixiviação abaixo de 0,60 cm do solo da Tabela 1.

Poluente	CAS	K_{oc} ($l \text{ k}^{-1}$)	Meia-vida (dias)	% risco
1,2,4-triclorobenzeno	120-82-1	885	180	0
1,2-diclorobenzeno	95-50-1	437	180	0
1,2-difenilhidrazina	122-66-7	243	180	0,2
1,3-diclorobenzeno	541-73-1	492	180	0
1,4-diclorobenzeno	106-46-7	442	180	0
2,4-dinitrofenol	51-28-5	53	263	30,2
2-clorofenol	95-57-8	94	30	16,2
3,3-diclorobenzidina	91-94-1	481	180	0
acenafteno	83-32-9	785	102	0
acenaftileno	208-96-8	804	60	0
antraceno	120-12-7	1481	460	0
benzidina	92-87-5	36	8	39,8
benzo(a)antraceno	56-55-3	7108	680	0
benzo(a)pireno	50-32-8	11070	530	0
benzo(b)fluoranteno	205-99-2	7280	610	0
benzo(g,h,i)perileno	191-24-2	20144	650	0
benzo(k)fluoranteno	207-08-9	10808	542	0
criseno	218-01-9	7546	993	0
dibenzo(a,h)antraceno	53-70-3	23256	940	0
fenantreno	85-01-8	1499	200	0
fenol	108-95-2	41	10	33,8
fluoranteno	206-44-0	3225	440	0
fluoreno	86-73-7	1072	60	0
hexaclorobenzeno	118-74-1	6857	2089	0
hexaclorobutadieno	87-68-3	2199	180	0
hexaclorociclopentadieno	77-47-4	3001	28	0
hexacloroetano	67-72-1	1022	180	0
indeno(1,2,3-c,d)pireno	193-39-5	21905	730	0
isoforano	78-59-1	55	28	30,5
m-cresol	108-39-4	75	30	22,4
naftaleno	91-20-3	374	75	0
nitrobenzeno	98-95-3	66	28	27,7
n-nitrosodifenilamina	86-30-6	305	34	0,1
n-nitrosodi-n-propilamina	621-64-7	37	180	38,7
o-cresol	95-48-7	74	30	22,6
p-cresol	106-44-5	73	30	24,0
pentaclorofenol	87-86-5	1852	178	0
pireno	129-00-0	2478	1898	0

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A lixiviação provável, simulada pelo CMLS94, de cada um dos trinta e oito poluentes está apresentada na Tabela 4. A análise de risco indicou que os poluentes benzidina, n-nitrosodi-n-propilamina, fenol, 2,4-dinitrofenol, isoforano, nitrobenzeno, p-cresol, o-cresol, m-cresol, e 2-clorofenol devem ser prioritariamente monitorados em águas subterrâneas de regiões de cultivos de milho onde foram usadas doses de lodos como fertilizantes, pois estes poluentes apresentaram riscos não-nulos. Por hipótese, foi suposto que os poluentes de risco para água subterrânea são aqueles que ultrapassam a zona radicular das plantas de milho, localizada entre a superfície e a profundidade de 0,60 m do solo (Sans e Santana, 2002). O simulador CMLS94 incorpora o WGEN permitindo a avaliação do risco de lixiviação de poluentes utilizando séries sintéticas de valores climáticos independentes e igualmente prováveis. Os resultados obtidos neste trabalho estão em conformidade com o estudo de Wilson et al. (1996). Nesse estudo foram utilizadas técnicas de seleção para indicar quais poluentes contidos em lodos têm potencial de lixiviação para águas subterrâneas. Cai et al. (2007) também realizaram estudos de avaliação da ocorrência de poluentes orgânicos de lodos de estações de tratamento de esgotos da China. A metodologia utilizada neste trabalho se mostrou eficiente na indicação do potencial do risco de contaminação de águas subterrâneas por poluentes orgânicos presentes em lodos, constituindo-se, assim, em uma valiosa ferramenta para utilização em gerenciamento ambiental.

Agradecimentos

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de formação de pesquisador de iniciação científica, PIBIC, ao projeto “*Avaliação da translocação de alguns contaminantes orgânicos presentes no lodo de esgoto, para o produto agrícola, visando à segurança do alimento: milho*” (MP3 - 03065100001/03065100002) da Embrapa Meio Ambiente e ao projeto auxílio à pesquisa “*Bioconcentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) em grãos de milho cultivados em solos com lodo de esgoto*” FAPESP 07/04427-8.

REFERÊNCIAS

- BETTIOL, W.; SANTOS, I. Efeito do lodo de esgoto em fitopatógenos veiculados pelo solo. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. 30 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 24).
- CAI, Q. Y.; MO, C. H.; WU, Q. T.; ZENG, Q. Y.; KATSOYIANNIS, A. Occurrence of organic contaminants in sewage sludges from eleven wastewater treatment plants, China. *Chemosphere*, v.68, p.1751-1762, 2007.

EPA. United States Environmental Protection Agency. Evaluation and estimation of potencial carcinogenic risks of polynuclear aromatic hydrocarbons. Washington: Carcinogen Assessment Group, Office of Health and Environmental Assessment, Office of Research and Development, 1985.

NOFZIGER, D. L; HORNSBY, A G. CMLS-94: chemical movement in layered soils. Gainesville: University of Florida, Department of Agronomy, 1994. 76p.

RICHARDSON, C. W.; WRIGHT, D. A. WGEN: a model for generating daily weather variables. Washington: USDA, Agricultural Research Service, 1984. 83p.

SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P. Cultivo do milho: clima e solo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 4p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 38).

SOBRINHO, P. A. Tratamento de esgoto e geração de lodo. 2001. In: TSUTIYA M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. (Eds.). Biossólidos na agricultura. São Paulo: SABESP, 2001. p.7-40.

TSUTIYA, M. T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. (Eds.). Biossólidos na agricultura. São Paulo: SABESP, 2001. p.89-131.

WILSON, S. C.; DUARTE-DAVIDSON, R.; JONES, K. C. Screening the environmental fate of organic contaminants in sewage sludges applied to agricultural soils: 1. The potencial for downward movement to groundwaters. *The Science of the Total Environment*, v.185, p.45-57, 1996.