

**UTILIZAÇÃO DE ÁGUA MARCADA PARA ANÁLISE DE TRANSPORTE  
NA SUBSUPERFÍCIE DE CONTAMINANTES**

Rafael G. A. Demuelenaere <sup>1</sup>; John E. L. Maddock <sup>2</sup>, Eurípedes A. Vargas Jr. <sup>3</sup> & José M. Godoy <sup>4</sup>

**RESUMO**

Com a escassez de água doce em todo o planeta a água subterrânea surge como a principal reserva para obtenção deste recurso vital. A preservação da água subterrânea em relação a possíveis fontes de contaminação é um dos grandes desafios do mundo moderno. Neste trabalho utilizou-se um traçador artificial não reativo, trício, em ensaios de coluna em um solo tropical indeformado do estado do Rio de Janeiro para a obtenção dos parâmetros necessários para o entendimento do transporte de contaminantes na subsuperfície. Espera-se que com os parâmetros obtidos seja possível fazer previsões confiáveis em relação à prevenção de acidentes ambientais e soluções mais eficientes e eficazes em casos de remediação de áreas contaminadas.

**ABSTRACT**

With fresh water scarcity throughout the planet, groundwater appears as the main reserve for supply of this vital resource. The preservation of the groundwater in relation to the possible sources of contamination is one of the great challenges of the modern world. In this work a non reactive artificial tracer – tritium – was used in column tests in undeformed tropical soil in the state of Rio de Janeiro in order to obtain the parameters necessary to the understanding of the contaminants transport in the subsurface. It is hoped that with the parameters obtained it will be possible to make trustworthy forecasts for prevention of environment accidents and plan efficient measures to remediate contaminated areas.

**Palavras-Chave** – Ensaio de Coluna, Trício e Solos Tropicais.

<sup>1</sup> Dep. de Geoquímica Ambiental, UFF, Outeiro São João Batista s/n, Centro, Niterói, RJ, Brasil. Tel.: (55) 02126292194. [rafaelgerard@hotmail.com](mailto:rafaelgerard@hotmail.com)

<sup>2</sup> Dep. de Geoquímica Ambiental, UFF, Outeiro São João Batista s/n, Centro, Niterói, RJ, Brasil. Tel.: (55) 02126292203. [jmaddock@geoq.uff.br](mailto:jmaddock@geoq.uff.br)

<sup>3</sup> Dep. de Eng. Civil, PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, Rio de Janeiro, Brasil. Tel.: (55) 02132571201. [vargas@civ.puc-rio.br](mailto:vargas@civ.puc-rio.br)

<sup>4</sup> Dep. de Química, PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, Rio de Janeiro, Brasil. Tel.: (55) 02132571130. [jmgodoy@civ.puc-rio.br](mailto:jmgodoy@civ.puc-rio.br)

## INTRODUÇÃO

Aproximadamente 96% da água na superfície da Terra está nos oceanos, 03% está na forma de gelo, 01% da água subterrânea, 0,01% em rios e lagos e apenas 0,001% na atmosfera (Freeze e Cherry, 1979). Temos então que aproximadamente 97% da água doce disponível para consumo é subterrânea. A tabela 01 mostra como a água subterrânea é largamente utilizada como origem em várias propostas.

Tabela 01. Principais usos da água. Solley et al. (1988).

Usos	Água Superficial (65%)	Água Subterrânea (35%)	% da Água Subterrânea
Agricultura	92.750	48.671	34
Fornecimento de água pública	21.995	14.660	40
Indústria e Mineração	19.610	5.267	21
Doméstico e Comercial	565	3.989	88

Unidade: milhões de galões por dia.

A contaminação do meio ambiente de subsuperfície com resíduos perigosos e tóxicos tem se tornado um dos maiores problemas ambientais em vários países, sendo que na maioria das vezes, as condições do local incluem a contaminação da água subterrânea (Demuelenaere, 2004).

Os processos de contaminação no solo ocorrem lentamente e, freqüentemente, sem conseqüências trágicas imediatas, porém em longo prazo, podem ter efeitos sérios e possivelmente irreversíveis (Yong et al, 1992).

As fontes de contaminação podem ser de vários tipos e atuar junto ou isoladamente. Por exemplo, lixiviado de aterros e áreas de disposição de resíduos; lixiviado de atividades agrícolas, fertilizantes e pesticidas; vazamento de tanques de estocagem subterrânea para produtos de petróleo e solventes entre outras formas (Fetter, 1993).

Conhecer o comportamento dos contaminantes no ambiente de subsuperfície é importante para a previsão de acidentes ambientais e para a avaliação de possíveis soluções. Para determinar os parâmetros necessários para o conhecimento do transporte dos contaminantes em solos por meio dos modelos analíticos é necessária a determinação dos processos físicos que controlam o fluxo na entrada e na saída do sistema, como por exemplo, advecção e dispersão hidrodinâmica.

Segundo Parker e van Genuchten (1984), parâmetros de transporte tais como velocidade da água nos poros ( $V$ ) e coeficiente de dispersão ( $D$ ) são determinados pela calibração da equação advectiva-dispersiva ou pela curva de chegada (breakthrough curve) de um traçador não reativo.

Segundo Seaman et al (1995), o traçador não reativo ( $R=1$ ) além de permitir a medida dos parâmetros de transporte  $V$  e  $D$  não alteram as propriedades de fluido da água subterrânea ou a química superficial e as propriedades de transmissividade da matriz do aquífero.

Apresenta-se aqui o uso de um traçador artificial não reativo, água triciada, para a obtenção de uma curva de chegada em um ensaio de coluna com transporte em uma dimensão para a obtenção dos parâmetros necessários para o entendimento do transporte de contaminantes na subsuperfície.

## MATERIAIS E MÉTODOS

*Coleta das amostras e armazenamento.* As amostras indeformadas de solo residual, para os ensaios de coluna, foram coletadas na Rodovia Washington Luís, em direção à Petrópolis, no município de Duque de Caxias no estado do Rio de Janeiro (BR 040 - Km 111) e armazenadas em câmara úmida até o início dos ensaios.

*Análises físicas e químicas.* Para determinação das análises físicas foram realizados ensaios para determinação da umidade, peso específico dos grãos, curva granulométrica e limites de liquidez e plasticidade, segundo procedimentos especificados pelas normas brasileiras – NBR 6508, NBR 6457, NBR 7181, NBR 6459 e NBR 7180 da ABNT.

*Difração de Raio-X.* Para a identificação dos componentes dos solos, procedeu-se a separação das frações areia, silte e argila por peneiramento e sedimentação. A determinação dos minerais da fração areia foi feita utilizando-se lupa binocular e microscópico petrográfico. As frações silte e argila foram separadas e analisadas com as frações passantes nas peneiras #40 e #200 utilizando um difratômetro de raios-x, marca Siemens, modelo D5000.

Todas as análises físicas foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio exceto pH, CTC, superfície específica, matéria orgânica e metais no solo, as quais foram realizadas no Laboratório de Solos, Água e Plantas da EMBRAPA do Rio de Janeiro.

*Análise do trício.* Retirou-se uma alíquota de 5mL de cada amostra, a qual foi misturada com 10mL de uma solução de cintilante em solvente orgânico com emulsificante. A radiação emitida pelo trício induz emissão de luz pelo cintilante, cuja intensidade é medida por uma foto-multiplicadora e registrada, técnica chamada de cintilação em meio líquido. Deste modo foi possível obter a curva de chegada para o traçador não reativo.

*Ensaio de Coluna.* O transporte e a retenção no solo, de contaminantes podem ser estudados pela percolação de soluções através de colunas com solos indeformados, “ensaios de coluna” que simulam as condições de fluxo no meio poroso obtendo o perfil de concentração do contaminante e seus subprodutos ao longo da coluna. Os equipamentos para realização dos ensaios de coluna foram desenvolvidos no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, consiste de um conjunto com colunas de paredes rígidas (acrílico), com 10cm de altura e 07cm de diâmetro, e Frasco de Mariotte (reservatório) para realização dos ensaios com carga constante e em condições de solo saturado. Para a obtenção da curva de chegada do traçador trício foi recolhido o efluente na base da coluna depois de percolado pelo solo indeformado.

*Análise da curva de chegada.* Os diversos mecanismos de transporte e processos de interação química entre o contaminante e o solo podem ser ilustrados por meio das curvas características do transporte típicas. A concentração do traçador como efluente foi plotada em um gráfico ( $C/C_0$ ) onde  $C_0$  é a concentração inicial versus o volume de vazios percolados da amostra que foi determinado pelas análises físicas do solo.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

*Caracterização da amostra.* O solo apresenta feições ricas em minerais máficos (biotita) e félsicos (feldspatos), conferindo ao referido solo respectiva alternância de camadas com porosidade e permeabilidade possivelmente diferenciadas. A feição do solo para estudo considerou a parte siltosa que apresenta uma coloração mais escura. Este material foi caracterizado como sendo um solo residual gnáissico siltoso com algumas características da rocha mãe. As tabelas 02 e 03 mostram os resultados mais significativos destas análises.

Tabela 02. Características físicas e químicas da amostra utilizada nos ensaios de coluna.

Análises	Resultados	
Granulometria	Pedregulho	1,7%
	Areia	24,1%
	Silte	39,3%
	Argila	34,9%
Índices Físicos	Umidade	20,46%
	Massa Específica Seca	1,20 g/cm <sup>3</sup>
	Porosidade	56%
	Índice de Vazios	1,29
Químicas	pH em água	4,9
	CTC	1,8 cmolc/Kg
	Superfície Específica	14,05 m <sup>2</sup> /g
	Matéria Orgânica	1,5%
	Metais	Zn – 0,562 mg/dm <sup>3</sup>

Tabela 03. Composição mineralógica do solo utilizado nos ensaios de coluna.

Fração	Composição
Areia	Biotita
	Feldspato Potássio
	Quartzo
Silte e Argila	Caolinita
	Gibbsita

*Curva de chegada do trício.* É esperado que o valor do fator de retardamento para um traçador não conservativo como a água triciada tenha um valor igual a um, isto é,  $R=1$ . Outros traçadores não reativos como o brometo ou cloreto também são utilizados com sucesso em solos de clima temperado. O trabalho de Seaman et al (1995), utilizou várias concentrações diferentes do brometo para a construção de curvas de chegada; seus resultados são semelhantes com os resultados encontrados para a água triciada neste trabalho.

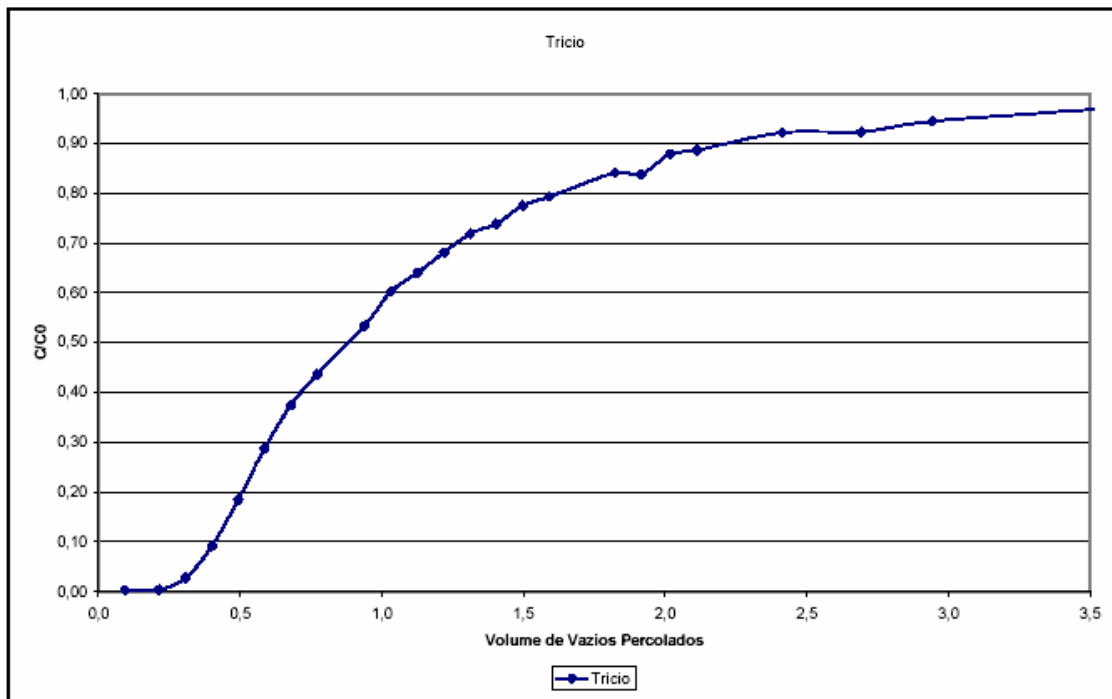


Figura 01. Curva de chegada para a água triciada.

Para conhecer o transporte de solutos na subsuperfície para uma dimensão, com carga constante e no estado estacionário, a equação apropriada é dada por:

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

onde:

c – concentração da solução,

D – coeficiente de dispersão,

R – fator de retardamento,

t – tempo,

v – velocidade média,

x – distância.

Segundo van Genuchten (1980), os coeficientes de dispersão e distribuição podem ser obtidos por meio desta solução analítica observando os dados de efluente dos ensaios de colunas. Esta equação contém dois parâmetros que precisam ser quantificados para se poder conhecer o transporte do soluto na subsuperfície, sendo eles (R e D). Estimativas destes parâmetros são freqüentemente obtidas pela análise de curvas de efluentes do ensaio de coluna; como a curva obtida na figura 01. Este trabalho irá apenas determinar o valor do coeficiente de dispersão, D. Pois é esperado que o valor do fator de retardamento para um traçador não conservativo como a água triciada tenha um valor igual a um, conforme já citado no artigo.

A união dos dados utilizados durante o ensaio, por exemplo, velocidade média, distância, volume de vazios da coluna; junto com a utilização de um programa numérico chamado STANMOD (desenvolvido por Rien van Genuchten e Jirka Simunek) nos conduziram à obtenção do coeficiente de dispersão da água triciada por meio destas duas equações:

$$T = \frac{v \cdot t}{L} \quad (2)$$

onde:

T – número de poros,

v – velocidade,

t – tempo de percolação,

L – comprimento da coluna.

$$P = \frac{v \cdot L}{D} \quad (3)$$

onde:

P – número de Peclet, obtido da simulação utilizando o programa STANMOD,

D – coeficiente de dispersão.

Deste modo, é possível obter o valor do coeficiente de dispersão, D igual a  $4,14 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{dia}$ .

## CONCLUSÕES

Determinar estes parâmetros por meio da curva de chegada de um traçador não reativo é o primeiro passo para entender a mobilidade dos contaminantes na subsuperfície. Com os parâmetros obtidos da curva de chegada para o traçador não reativo, poderemos determinar o coeficiente de retardamento de contaminantes neste solo fazendo a superposição da curva de chegada deste traçador com a curva de chegada do contaminante. Além de podermos conhecer com melhor exatidão os valores dos processos físicos envolvidos neste modelo de fluxo em uma dimensão (dispersão hidrodinâmica e advecção).

A importância de conhecer a mobilidade de determinado contaminante em um determinado ambiente está no fato de ter a possibilidade de fazer previsões para futuros acidentes e/ou ter soluções mais eficientes e eficazes em casos de remediação de uma área já contaminada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEMUELENAERE, R. G. A., 2004. Caracterização de Propriedades de Transporte de Metais Pesados em Solos Residuais do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 120 p.

FETTER, C. W., 1993. Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company, U.S. 458p.

FREEZE, R. A. E Cherry, J. A., 1979. Groudwater. Prentice Hall, Inc. U.S. 604p.

PARKER, J. C. E van Genuchten, M.Th., 1984. Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments. Va. Polytech. Inst., Va. Agric. Exp. Stn., Blacksburg, VA, Bull. N°. 84-3.

SEAMAN, J. C. et al, 1995. Ionic tracer movement through highly weathered sediments, *Journal of Contaminant Hydrology* vol. 20, p.127-143.

SOLLEY, W. B. et al, 1988. Estimated use of water in the United status in 1985. U.S. Geological Survey Circular 1004.

VAN GENUCHTEN, M. Th., 1980. Determining transport parameters form solute displacement experiences. United States Department of Agriculture. Science and Education Administration. U.S. Salinity Laboratory. Riverside, Califórnia.

YONG, R. N. et al, 1992. Principles of Contaminant Transport in Soils. Elsevier. 327p.