



Rem: Revista Escola de Minas

ISSN: 0370-4467

editor@rem.com.br

Escola de Minas

Brasil

Barbosa Júnior, Antenor Rodrigues; Silva, Gilberto Queiroz da; Neves, Betânia Vilas Boas; Devens, Julimara Alves

Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água naturais

Parte 2 - Aplicação e comparação dos métodos

Rem: Revista Escola de Minas, vol. 58, núm. 2, abril-junio, 2005, pp. 139-145

Escola de Minas

Ouro Preto, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56416464008>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água naturais

Parte 2 - Aplicação e comparação dos métodos

Antenor Rodrigues Barbosa Júnior

Prof. Dr., Departamento de Engenharia Civil - Escola de Minas / UFOP
E-mail: barbosa@em.ufop.br

Gilberto Queiroz da Silva

Prof. MSc., Departamento de Engenharia Civil - Escola de Minas / UFOP

Betânia Vilas Boas Neves

Graduanda em Engenharia Civil - Escola de Minas / UFOP

Julimara Alves Devens

Graduanda em Engenharia Civil - Escola de Minas / UFOP

Resumo

Nesse artigo, se discutem os resultados de 22 testes de campo realizados em diferentes cursos d'água naturais com o emprego de traçadores ambientalmente neutros. Nos testes, a velocidade média do escoamento é estimada a partir do tempo de viagem da nuvem do traçador e o coeficiente de dispersão longitudinal é avaliado segundo cinco diferentes métodos diretos, que foram descritos na Parte 1 desse trabalho. A qualidade dos resultados das avaliações é analisada com base nas determinações feitas pelo método da propagação, por ser este considerado superior aos demais. Os resultados de cinco testes de campo serviram, ainda, para a análise de reproduzibilidade dos métodos, enquanto quatro outros testes permitiram também a avaliação da pequena influência do método de injeção do traçador na determinação do coeficiente de dispersão pelo método da propagação.

Palavras-chave: dispersão longitudinal, traçadores, poluição da água.

Abstract

The results of twenty-two field tests accomplished in steady flow with the employment of tracing techniques in different streams are discussed in this article. The mean stream velocity is appraised from the travel time of the tracer cloud, and the longitudinal dispersion coefficient is evaluated by five different direct methods that were discussed on part 1 of this work. The quality of the results is analyzed based on the determinations made by the routing procedure, that is taken as superior to the others. The results of five of the tests were also good for the reproduction analysis, while four other tests allowed for an evaluation of the small influence of the tracer's injection method in the determination of the longitudinal dispersion coefficient for the routing procedure.

Keywords: longitudinal dispersion, tracers, water pollution.

1. Introdução

Esse artigo tem como principal objetivo a comparação de cinco diferentes métodos de determinação direta do coeficiente de dispersão longitudinal (E_L): método dos momentos, método da propagação, método de Chatwin, método do pico de concentração (MPC) e método da coroa de concentração (MCC), que foram definidos num artigo anterior. O trabalho traz os resultados de estudos de campo em que se empregou a técnica dos traçadores

Para avaliar o coeficiente de mistura transversal da Eq.(01), foi empregada a expressão dada por Kilpatrick e Wilson (1989)

$$\varepsilon_z = 0,2 \cdot u_* \cdot H \quad (2)$$

sendo:

H - profundidade média do escoamento, medida em m.

u_* a velocidade de atrito, em m/s, definida como $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$, onde τ_0 é a tensão de cisalhamento junto à parede e ρ é a massa específica da água, em unidades do Sistema Internacional.

Os testes 3 a 6, conduzidos no córrego da Capela, serviram para uma análise da influência do tempo de injeção do traçador sobre o valor de E_L produzido pelo método da propagação. Nas injeções prolongadas dos testes 4, 5 e 6, foi utilizado um frasco de Mariotte, como forma de produzir a injeção do traçador com uma taxa constante. Os testes 7 a 11, nesse mesmo córrego, foram executados visando à análise de reprodutibilidade de todos os métodos empregados.

2. Estudo experimental

De forma resumida, a técnica experimental adotada consistiu em injetar a substância traçadora em um ponto localizado no eixo do curso d'água e, a jusante, em duas seções transversais ao escoamento e separadas de uma certa distância, colher as amostras ao longo do tempo para permitir a construção das curvas de resposta do traçador (curvas de concentração versus tempo). Para a amostragem, uma distância mínima do ponto de injeção foi sempre respeitada, visando-se, garantir a mistura completa do traçador, por ser essa uma condição necessária para que o processo se torne unidimensional.

O comprimento requerido para a mistura completa do traçador foi estimado a partir de uma equação adaptada de Yotsukura e Cobb (1972):

$$L_0 = K \cdot \frac{U \cdot B^2}{\varepsilon_z} \quad (01)$$

onde:

L_0 = comprimento requerido para a mistura [m].

U = velocidade média do escoamento [m/s].

B = largura média do trecho de mistura [m].

ε_z = coeficiente de mistura transversal (difusividade turbulenta transversal) [m^2/s].

K = coeficiente adimensional, cujo valor leva em conta o grau de mistura e o número e a posição dos pontos de injeção. O valor aqui tomado de $K=0,1$ na Eq.(01), refere-se a um grau de praticamente 95% de mistura, para um único ponto de injeção localizado no eixo do escoamento.

3. Resultados e discussões

Uma descrição resumida das características dos trechos de teste é apresentada na Tabela 1, juntamente com os resultados de cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal pelos cinco métodos comparados. Para os métodos que permitem a obtenção de E_L com dados de apenas uma seção de amostragem, a seção mais a jusante foi considerada, uma vez que a advecção influencia mais fortemente a seção próxima do ponto de injeção.

A análise de reprodutibilidade do método da propagação, bem como dos quatro outros métodos comparados, foi realizada com base nos resultados de cinco estudos de campo (testes 7 a 11). Nesses estudos, além da repetição da forma da injeção do traçador (injeção instantânea nos cinco casos), também foi verificada a manutenção da vazão do curso d'água em todo o período de realização dos testes. Os resultados dos testes 7 a 11, que constam da Tabela 1, também são fornecidos na Tabela 2, juntamente com as estatísticas média, desvio-padrão e coeficiente de variação. Na última coluna dessa tabela, são comparados os valores médios dos testes, obtidos pelos diferentes métodos, com aquele produzido pelo método da propagação. A análise da Tabela 2 mostra que a reprodutibilidade, medida pelo coeficiente de variação, é de apenas 6% para os métodos da propagação, Chatwin e MCC, sobe para 9% quando se usa o MPC e aumenta para um pouco mais de 20%, quando se considera o método dos

Tabela 1 - Resumo das características geométricas e hidrodinâmicas dos trechos de teste e resultados dos cálculos do coeficiente de dispersão longitudinal, E_L , por cinco diferentes métodos diretos.

Teste nº	Curso d'água	Data	Injeção	Q (m ³ /s)	B (m)	U (m/s)	H (m)	S (m/m)	E_L (m ² /s)			
									Propagação	Momentos	Chatwin	Eq. 27
												Eq. 32
1	Cor. Capela ¹	01/09/2000	instantânea	0,00706	0,75	0,317	0,030	0,00772	0,446	4,264	0,107	0,276
2	Cor. Capela	01/09/2000	instantânea	0,00706	0,75	0,321	0,029	0,00772	0,372	2,840	0,116	0,288
3	Cor. Capela	12/10/2000	instantânea	0,00521	0,72	0,264	0,028	0,00772	0,325	1,438	0,096	0,251
4	Cor. Capela	12/10/2000	contínua/1min	0,00521	0,72	0,272	0,027	0,00772	0,273	0,344	0,138	0,382
5	Cor. Capela	12/10/2000	contínua/2min	0,00521	0,72	0,236	0,031	0,00772	0,315	1,159	0,118	0,270
6	Cor. Capela	12/10/2000	contínua/30min	0,00521	0,72	0,227	0,032	0,00772	0,438	---	---	---
7	Cor. Capela	17/02/2001	instantânea	0,01317	2,20	0,317	0,019	0,00552	1,220	1,753	0,215	0,650
8	Cor. Capela	17/02/2001	instantânea	0,01317	2,20	0,316	0,019	0,00552	1,290	1,468	0,244	0,729
9	Cor. Capela	17/02/2001	instantânea	0,01317	2,20	0,312	0,019	0,00552	1,150	2,351	0,215	0,569
10	Cor. Capela	17/02/2001	instantânea	0,01317	2,20	0,340	0,018	0,00552	1,110	1,466	0,230	0,655
11	Cor. Capela	17/02/2001	instantânea	0,01317	2,20	0,331	0,018	0,00552	1,120	1,617	0,212	0,623
12	Cór. Fundão	07/04/2001	instantânea	0,01134	1,40	0,094	0,086	0,00745	0,226	0,275	0,121	0,318
13	Cór. Fundão	07/04/2001	instantânea	0,01134	1,40	0,083	0,098	0,00745	0,167	0,234	0,116	0,213
14	Laranja Azeda	21/06/1994	instantânea	0,520	4,00	0,255	0,510	0,00265	1,100	3,770	0,680	0,645
15	Laranja Azeda	06/03/1995	instantânea	1,200	4,50	0,329	0,811	0,00265	2,010	3,620	0,920	1,118
16	Feijão	16/05/1994	instantânea	2,800	10,00	0,519	0,539	0,00387	4,220	5,480	2,410	3,879
17	Feijão	11/04/1995	instantânea	4,300	11,00	0,598	0,654	0,00387	6,090	6,750	3,040	5,467
18	Jacaré Guacu	17/08/1994	instantânea	11,250	20,00	0,412	1,365	0,00050	6,000	6,130	3,230	2,565
19	Jacaré Guacu	20/09/1994	instantânea	9,000	20,00	0,400	1,125	0,00050	5,640	5,650	2,160	1,748
20	Caldas-tr.1	21/03/1995	instantânea	3,000	10,00	0,760	0,395	0,00231	7,690	---	---	3,389
21	Caldas-tr.1	27/06/1995	instantânea	0,800	10,00	0,456	0,175	0,00231	8,000	14,490	1,040	10,274
22	Caldas-tr.2	27/06/1995	instantânea	0,840	10,00	0,393	0,214	0,00143	7,280	18,180	2,370	12,544

¹ Ou córrego da Fazenda dos Fernandes

* Método não aplicável - injeção muito prolongada (Teste incluído para analisar a influência da injeção no método da propagação).

Q = vazão, B = largura do canal, U = velocidade média, H = profundidade do escoamento, S = declividade do canal, L_0 = comprimento de mistura

Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água naturais...

momentos. Adicionalmente, a Tabela 2 evidencia uma grande diferença entre os valores dos coeficientes de dispersão produzidos pelos cinco métodos: os métodos mais simples de Chatwin, MPC e MCC, em média subestimam o coeficiente de dispersão longitudinal que, de modo diferente, é superestimado pelo método dos momentos.

Uma análise do efeito do tempo de injeção sobre o coeficiente de dispersão, medido pelo método da propagação, foi realizada com base em quatro estudos de campo (testes 3 a 6), em que se utilizaram soluções salinas como traçador. Nos testes de campo, as injeções foram feitas instantaneamente (teste 3) e com as durações de 1 min, 2 min e 30 min (testes 4, 5 e 6, respectivamente). O resultado da análise, apresentado na Tabela 3, mostra que o valor médio de E_L foi de $0,338 \text{ m}^2/\text{s}$, com um desvio-padrão de $0,071 \text{ m}^2/\text{s}$, o que corresponde a um coeficiente de variação de 21%. Cumpre destacar que o maior desvio da média foi encontrado no teste 6 (desvio de 30%), quando a injeção se fez por 30 minutos, um tempo muito prolongado para o pequeno curso d'água onde o teste foi realizado. Com efeito, nesse teste, a distribuição de concentração atingiu um patamar em cada uma das seções de amostragem. Se for descartado o teste 6, a média será de $0,304 \text{ m}^2/\text{s}$ e o maior desvio da média será inferior a 10%.

A despeito da pequena base de dados, os resultados dos testes para a análise do efeito do tempo de injeção sugerem que esse efeito é pequeno, principalmente se for considerada a própria reproduzibilidade do método da propagação. Pode-se afirmar que tal resultado já era esperado, pelo fato de o método da propagação não utilizar diretamente as informações da injeção e, sim, o seu efeito sobre a forma da curva de concentração versus tempo efetivamente observada na seção de amostragem mais próxima da injeção. Independentemente da forma da curva, no método ela é discretizada em elementos de concentração (ou elementos de massa), que, no processo,

Tabela 2 - Análise de reproduzibilidade e comparação dos métodos com base nos resultados dos testes 7 a 11.

Método	E_L (média) (m^2/s)	Desvio-padrão (m^2/s)	Coeficiente de variação	Desvio do método da propagação
Propagação	1,18	0,076	6%	0%
Momentos	1,73	0,366	21%	47%
Chatwin (seção de jusante)	0,22	0,014	6%	-81%
MPC (seção de jusante)	0,65	0,059	9%	-45%
MCC (seção de jusante)	0,61	0,036	6%	-48%

Tabela 3 - Análise do efeito do tempo de injeção sobre o coeficiente E_L produzido pelo método da propagação, com base nos resultados dos testes 3 a 6.

Teste Nº	Tempo de injeção	E_L (m^2/s)	Desvio da média
3	instantânea	0,325	-4%
4	1 min	0,273	-19%
5	2 min	0,315	-7%
6	30 min	0,438	30%
Média		0,338	

atuam como fontes instantâneas para produzir, a partir da aplicação do princípio da superposição, a curva de concentração versus tempo na seção de jusante. O procedimento de obtenção de E_L pelo método da propagação compara a curva medida com a curva gerada pela aplicação do princípio da superposição, independentemente da forma da injeção.

Para comparar os métodos diretos de obtenção do coeficiente de dispersão longitudinal, as distribuições de concentração versus tempo geradas em cada teste foram processadas para produzir os coeficientes de dispersão longitudinal pelo método da propagação, método dos momentos, método gráfico de Chatwin e pelos métodos simplificados MPC e MCC.

Tomando-se como referência o método da propagação, os diferentes métodos foram comparados para 21 dos 22 testes da Tabela 1: a forma da curva de concentração versus tempo produzida no teste 6 não permite a aplicação de quatro dos métodos comparados. Os resultados produzidos, nessa comparação, na forma de erros percentuais relativos, onde o método da propagação é tomado como referência, são também apresentados na Tabela 4. Essa Tabela mostra que: o método dos momentos superestima sistematicamente o coeficiente de dispersão longitudinal; o método de Chatwin sempre produz valores inferiores aos do método da propagação; e os métodos MPC e MCC quase sempre subestimam o coeficiente E_L . Vê-se, ainda, que

Tabela 4 - Comparação dos coeficientes de dispersão longitudinal, E_L , produzidos por diferentes métodos.

Teste nº	Curso d'água	Data	Injeção	Erro percentual relativo:			
				Momentos	Chatwin	Eq.27	Eq.32
1	Capela	01/09/2000	Instantânea	856,1	-76	-38,0	-52,1
2	Capela	01/09/2000	Instantânea	663,4	-68,8	-22,7	-43,4
3	Capela	12/10/2000	Instantânea	342,5	-70,5	-22,8	-46,9
4	Capela	12/10/2000	Contínua/1min	26	-49,5	39,8	-36,4
5	Capela	12/10/2000	Contínua/2min	267,9	-62,5	-14,4	-48,5
6	Capela	12/10/2000	Contínua/30min	-	-	-	-
7	Capela	17/02/2001	Instantânea	43,7	-82,4	-46,7	-47,3
8	Capela	17/02/2001	Instantânea	13,8	-81,1	-43,5	-49,2
9	Capela	17/02/2001	Instantânea	104,4	-81,3	-50,5	-50,4
10	Capela	17/02/2001	Instantânea	32,1	-79,3	-39,8	-46,9
11	Capela	17/02/2001	Instantânea	44,4	-81,1	-44,4	-46,3
12	Fundão	07/04/2001	Instantânea	21,7	-46,5	40,5	-15,1
13	Fundão	07/04/2001	Instantânea	40,1	-30,5	27,7	23,5
14	Laranja Azeda	21/06/1994	Instantânea	242,7	-38,2	-41,3	-30,2
15	Laranja Azeda	06/03/1995	Instantânea	80,1	-54,2	-44,4	-48,7
16	Feijão	16/05/1994	Instantânea	29,9	-42,9	-8,1	23,2
17	Feijão	11/04/1995	Instantânea	10,8	-50,1	-10,2	-11,1
18	Jacaré Guaçu	17/08/1994	Instantânea	2,2	-46,2	-57,3	-25,3
19	Jacaré Guaçu	20/09/1994	Instantânea	0,2	-61,7	-69,0	-21,6
20	Caldas (tr.1)	21/03/1995	Instantânea	---	---	-55,9	-44,7
21	Caldas (tr.1)	27/06/1995	Instantânea	81,1	-87,0	28,4	-59,8
22	Caldas (tr.2)	27/06/1995	Instantânea	149,7	-67,4	72,3	-19,4
Desvio percentual médio				152,6	-62,9	-19,1	-33,2

---* Não calculado devido a problemas com a amostragem.

o MPC e MCC são os que mais se aproximam dos valores de E_L produzidos pelo método da propagação. Essas conclusões são mais facilmente concebidas da análise da Figura 1.

A despeito da grande aceitação do método dos momentos, os valores de E_L

calculados por esse método foram de 1 a 10 vezes superiores àqueles gerados pelo método da propagação, conforme também é evidenciado pela Figura 1. Uma possível justificativa para essas discrepâncias é que o método dos momentos baseia-se no comportamento gaussiano

da solução fundamental da equação da advecção-dispersão, que, a rigor, só é satisfeita para distribuições espaciais de concentração. Ademais, o método postula um aumento linear da variância da distribuição espacial de concentração, que é uma condição nem sempre obser-

vada, principalmente quando os trechos de teste são relativamente curtos. Uma vez que o estudo utiliza distribuições temporais de concentração, o método exigiu a introdução da simplificação imposta pela hipótese da nuvem congelada, que, por sua vez, não considera a dispersão sofrida pelo traçador durante todo o tempo de sua passagem pela estação de amostragem. Além disso, as longas caudas observadas nas curvas de concentração versus tempo produzem efeito significativo sobre os momentos de ordem 1 e 2, que estão presentes na fórmula de cálculo de E_L .

Para o emprego do método de Chatwin e para o MPC e o MCC, apenas os dados de concentração x tempo relativos à seção de amostragem de jusante foram considerados.

O modelo simplificado do MPC postula um decaimento da concentração de pico do traçador, C_p , com o inverso da raiz quadrada da distância à seção de medição, $x_p^{-1/2}$. O fato de os dados gerados serem de concentração versus tempo exigiu a introdução da hipótese da nuvem congelada, que é uma aproximação capaz de introduzir erro na estimativa. Contudo o principal problema relativo ao uso do MPC está no fato de que a determinação do coeficiente E_L é feita da inclinação de uma linha reta, que, para uma maior precisão, exigiria que o seu traçado fosse feito com base em um número suficientemente grande de pontos experimentais. Mas, nesse estudo, dispõe-se de apenas duas seções de amostragem, logo, dois únicos pares de valores de C_p e $x_p^{-1/2}$. Isto, seguramente, pode se constituir em uma importante fonte de erro, principalmente se a primeira seção de amostragem se encontrar dentro da zona advectiva. Para superar esse problema, foi desprezado o ponto referido à primeira seção de amostragem e, em lugar desse, considerou-se um ponto virtual localizado no infinito, onde $C_p = 0$ e $x_p^{-1/2} = 0$. Essa prática fez com que os resultados em termos de E_L melhorassem significativamente, aproximando-se mais do método-padrão.

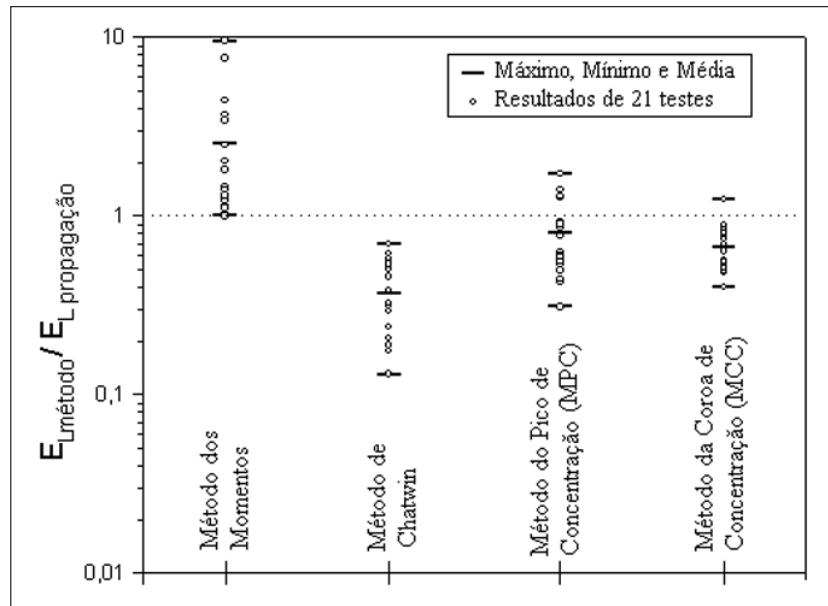


Figura 1 - Comparações dos resultados dos coeficientes de dispersão longitudinal segundo os diferentes métodos de determinação.

No uso do MCC, que também exige a imposição da hipótese da nuvem congelada, o valor calculado de E_L corresponde à média aritmética das concentrações de referência tomadas na coroa da curva, a 50% e 75% do valor de pico. Nessa faixa, a forma da distribuição de concentração é mais simétrica e, talvez, por isso, os resultados visualizados na Figura 1 tenham sido os que melhor compararam com o método da propagação.

4. Conclusões

Os resultados dos estudos de campo com traçadores conservativos e ambientalmente neutros mostraram que os coeficientes de dispersão longitudinal de cursos d'água naturais podem ser fortemente influenciados pelo método utilizado na sua determinação. Uma possível explicação para as diferenças nos valores de E_L produzidos pelos diferentes métodos está no fato de que estes derivam da solução fundamental da equação da advecção-dispersão e introduzem simplificações nem sempre rigorosamente válidas.

Para efeito de comparação dos métodos, foram tomados como base os resultados produzidos pelo método da propagação. Isto porque o método da propagação é considerado superior aos demais, por superar as dificuldades associadas às longas caudas nas distribuições de concentração. Além disso, por utilizar o princípio da superposição, o método independe da forma do lançamento do traçador e é capaz de ajustar o valor de E_L que melhor compara as concentrações geradas pelo modelo e aquelas medidas nos testes de campo.

Os métodos simples, baseados na solução fundamental da equação da advecção-dispersão, e resumidos pelos modelos MPC e MCC, foram, dentre todos os métodos de determinação direta de E_L , os que mais se aproximaram dos resultados produzidos pelo método da propagação. Isto sugere a possibilidade de se utilizarem, em cálculos rápidos, as informações de uma única estação de amostragem, o que simplifica os trabalhos de campo com a técnica dos traçadores.

A análise de reprodutibilidade do método da propagação, feita com base

nos resultados de cinco estudos de campo, onde foi assegurada a repetição da forma da injeção do traçador (injeção instantânea) e a manutenção da vazão do curso d'água, em todo o período de teste, apresentou um desvio da média (coeficiente de variação) de apenas 6%.

A despeito da pequena base de dados, a análise do efeito do tempo de injeção sobre o coeficiente de dispersão medido pelo método da propagação, como resultado de quatro testes de campo (testes 3 a 6), mostrou que há uma pequena dependência de E_L em relação ao tempo de injeção do traçador.

5. Referências bibliográficas

- BARBOSA JR., A.R. *Uso de traçadores na determinação de parâmetros de qualidade em escoamentos naturais da água*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997. 457p. (Tese).
- DEVENS, J.A. *Medida do coeficiente de dispersão longitudinal de pequenos cursos d'água naturais com o emprego de traçador conservativo*. Ouro Preto: Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2001. 108p. (Relatório).
- KILPATRICK, F.A., WILSON Jr., J.F. *Measurement of time of travel in streams by dye tracing*. Techniques of Water-Resources Investigations of the U. S. Geological Survey, Book 3, Chapter A9. 1989.
- NEVES, B.V. B. *Análise de dispersão de substâncias conservativas em cursos d'água naturais - modelo para o efeito de zonas mortas*. Ouro Preto: Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2001. 120p. (Relatório).
- YOTSUKURA, N., COBB, E.D. *Transverse diffusion of solutes in natural streams*. Dispersion in Surface Water. U. S. Geological Survey Professional Paper 582-C. 1972.

Artigo recebido em 30/06/2003 e
aprovado em 11/03/2005.



**A questão
SEER ou não
SEER
deixou de existir:**

**Agora os autores utilizarão
o SEER
para enviar e acompanhar
seu artigo até o momento
da publicação.**

www.rem.com.br

REM: 69 anos divulgando Ciência!