

Modelos Empíricos e Semi-Empíricos para a Obtenção do Coeficiente de Dispersão Longitudinal de Pequenos Cursos de Água

Julimara Alves Devens, Antenor Rodrigues Barbosa Júnior, Gilberto Queiroz da Silva

Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas - UFOP
julimaradevens@yahoo.com.br; barbosa@em.ufop.br, gqueiroz@em.ufop.br

Marcus Fantozzi Giorgetti

Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC/USP
marciusg@sc.usp.br

Recebido: 21/03/09 - revisado: 21/10/09 - aceito: 09/03/10

RESUMO

Os métodos simples que usam fórmulas práticas para a previsão do coeficiente de dispersão longitudinal em pequenos cursos d'água naturais são discutidos neste artigo. Dez fórmulas práticas de previsão do coeficiente são comparadas. A base de comparação são os resultados de 22 estudos de campo em que o coeficiente é obtido diretamente com o uso de traçadores ambientalmente neutros. A técnica de obtenção direta do coeficiente apóia-se em metodologia derivada de modelo clássico, tipo Fickiano. A análise dimensional é utilizada para a obtenção dos grupos adimensionais relevantes no processo de transporte de massa e para deduzir um modelo matemático alternativo para o coeficiente de dispersão longitudinal. Este modelo é ajustado pela técnica de regressão múltipla e, ao final, para a sua validação, é aplicado a novos dados de estudos de campo realizados no trecho urbano de um curso d'água natural.

Palavras-chave: dispersão longitudinal, traçador, qualidade da água.

INTRODUÇÃO

O lançamento de efluente líquido em corpos d'água, seja ele intencional ou acidental, constitui uma das principais preocupações dos órgãos ambientais. Lançamentos isentos ou não de tratamento prévio, não só colocam em risco a vida aquática, como também comprometem as diferentes modalidades de usos dos recursos hídricos superficiais.

Em estudos com modelos de qualidade da água, o parâmetro conhecido como coeficiente de dispersão longitudinal, E_L , informa sobre a capacidade do curso d'água para dispersar poluentes. Esse parâmetro tem significado especial na análise de problemas ambientais que requerem a utilização de modelos de qualidade da água para a previsão de distribuições espacial e temporal da concentração de poluentes. Tais previsões mostram-se especialmente úteis quando se busca definir o nível de tratamento dos resíduos compatível com a qualidade exigida para a água do corpo receptor, ou quando se visa encontrar o ponto mais adequado de lança-

mento do efluente de modo a causar o menor impacto possível. Isto é, conhecer bem a capacidade de um curso d'água para dispersar poluentes é uma necessidade básica para se compatibilizar condições de lançamento de efluentes e controle de qualidade da água, quando se visa atender às disposições presentes na Resolução CONAMA nº 357 (CONAMA, 2005).

Formulação Matemática

O processo de dispersão do poluente em cursos de água naturais, em regiões localizadas a distância suficientemente grande do ponto de lançamento, pode ser descrito por um modelo unidimensional, obtido da aplicação do balanço de massa em que o fluxo dispersivo é regido pela lei de Fick. Na forma diferencial, a equação governante é do tipo

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = E_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

onde E_L é o coeficiente de dispersão longitudinal; U é a velocidade média do escoamento; C representa o valor médio da concentração na seção transversal localizada à distância longitudinal x do ponto de lançamento; e t é o tempo em que o processo se desenvolve. A Eq.1 é a conhecida equação da advecção-dispersão longitudinal, cuja solução fundamental, obtida para o lançamento pontual e instantâneo de uma massa M em $x_0 = 0$ e $t_0 = 0$, num canal de área da seção transversal igual a A , é da forma

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi E_L t}} \exp\left[-\frac{(x - Ut)^2}{4E_L t}\right] \quad (2)$$

DETERMINAÇÃO DIRETA DE E_L

Os vários métodos de obtenção direta do coeficiente de dispersão longitudinal derivam da Eq.1 e da sua solução. Esses métodos apóiam-se em dados de campo, gerados de testes em que se utilizam traçadores ambientalmente neutros. Entre os mais conhecidos, destacam-se o método dos momentos, o método da propagação (*routing procedure*) e os métodos gráficos de Krenkel e Chatwin, além de dois outros procedimentos simples baseados na concentração máxima (pico de concentração) e nos valores de entorno da concentração máxima (Barbosa Jr. et al., 2005a, 2005b).

O método da propagação, desenvolvido por Fischer (1968), é considerado superior aos demais. Esse método utiliza a “hipótese da nuvem congelada” para transformar dados de concentração versus tempo, medidos numa seção de montante, em dados de concentração versus distância, gerados em um tempo característico, para, em seguida, fazer a sua propagação para novo tempo característico posterior. Em seguida, utilizando novamente a “hipótese da nuvem congelada”, os dados gerados pela propagação são reconvertidos em dados de concentração versus tempo, que são comparados com os valores medidos em uma estação de jusante. Na forma apresentada por French (1985), a concentração na seção de jusante se escreve como

$$C(x_B, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{U \cdot C(x_A, \tau)}{\sqrt{4\pi E_L (\bar{t}_B - \bar{t}_A)}} \exp\left\{-\frac{[U(\bar{t}_B - \bar{t}_A - t + \tau)]^2}{4E_L (\bar{t}_B - \bar{t}_A)}\right\} d\tau \quad (3)$$

em que x_A e x_B representam as posições das estações de amostragem de montante e jusante, respectivamente; \bar{t}_A e \bar{t}_B são os tempos característicos, normalmente representados pelos tempos médios de passagem da nuvem do traçador pelas seções de montante e jusante, respectivamente; e τ é uma variável temporal auxiliar de integração.

Apoiando-se em dados de campo, a Eq.3 é resolvida por tentativa e erro com valores selecionados de U e E_L . Os valores da velocidade média e do coeficiente de dispersão longitudinal do trecho de teste são aqueles que proporcionam o melhor ajuste da curva gerada pela solução da Eq.3 aos dados de campo de C e t medidos na estação de jusante.

FÓRMULAS PRÁTICAS DE ESTIMATIVA DE E_L

Equações de natureza empírica e semi-empírica, genericamente denominadas fórmulas práticas, têm sido utilizadas na previsão do coeficiente de dispersão longitudinal. Essas equações relacionam o coeficiente E_L com quantidades físicas de fácil obtenção, como profundidade média, largura, declividade e velocidade média ou vazão do escoamento.

Apesar dos métodos de determinação direta de E_L produzirem os valores mais confiáveis desse parâmetro, o custo e o tempo despendidos na sua obtenção tornam atrativo o uso de fórmulas práticas de previsão. Uma apresentação de dez das mais conhecidas fórmulas de previsão de E_L é feita a seguir.

Equação de Elder

Visando a aplicação da análise de Taylor para o escoamento em condutos livres, Elder (1959) propôs um valor constante para o coeficiente de dispersão longitudinal adimensional, α_E , escrito na forma

$$\frac{E_L}{u_* \cdot H} = \alpha_E \quad (4)$$

onde u_* é a velocidade de atrito e H é a profundidade média do escoamento. De experimentos em calhas de laboratório, Elder encontrou $\alpha_E = 5,93$.

Fórmula de McQuivey & Keefer

McQuivey & Keefer (1974) propuseram um método simples de previsão de E_L a partir de correções com dados de campo de 18 testes em cursos de água naturais, em 14 diferentes estágios do escoamento. Baseando-se na analogia entre as equações de fluxo linear unidimensional e a equação linear unidimensional da dispersão, obtiveram

$$E_L = 0,058 \frac{Q}{S \cdot B} \quad \text{para } F < 0,5 \quad (5)$$

onde E_L em m^2/s ; S é a declividade da linha de energia, em m/m ; B é a largura à superfície livre, em m ; Q é a vazão, em m^3/s ; e F é o número de Froude.

Fórmula de Fischer

Fischer et al. (1979), baseando-se em estimativas de E_L com a fórmula prática de McQuivey & Keefer (1974) e em algumas considerações adicionais, apresentaram uma fórmula prática para estimar o coeficiente E_L . Segundo Fischer et al., em unidades do S.I.:

$$E_L = 0,011 \frac{U^2 B^2}{u_* H} \quad (6)$$

em que U é a velocidade média do escoamento (m/s) e as demais grandezas são conforme já definidas. Para envolver quantidades físicas facilmente mensuráveis, a velocidade de atrito foi escrita em termos da tensão de cisalhamento junto à parede, τ_0 , considerando, ainda, numa aproximação, os canais largos, situação em que o raio hidráulico pode ser tomado como aproximadamente igual à profundidade média do escoamento, de modo que

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g \cdot R_H \cdot S} \cong \sqrt{g \cdot H \cdot S} \quad (7)$$

sendo R_H o raio hidráulico (m); ρ a massa específica da água (kg/m^3); e g a aceleração da gravidade (m/s^2).

Fórmula de Liu

Liu (1977) encontrou grandes erros de previsão de E_L com o uso das fórmulas práticas de McQuivey & Keefer (1974) e de Fischer et al. (1979).

Na avaliação de Liu, os valores de E_L estimados foram, respectivamente, 715 e 18 vezes maiores do que os medidos. A partir de outro modelo apresentado por Fischer (Fischer et al., 1979), que considera as variações laterais de velocidade, Liu propôs uma fórmula simples de previsão de E_L para canais largos, escrita na forma

$$E_L = \beta_L \frac{Q^2}{u_* R_H^3} \quad (8)$$

com o coeficiente adimensional β_L correlacionado com o fator de atrito da equação de Darcy-Weissbach. Com base em dados da literatura para 14 cursos de água naturais, Liu propôs a relação

$$\beta_L = 0,18 \left(\frac{u_*}{U} \right)^{1,5} \quad (9)$$

válida para a faixa $0,001 \leq \beta_L \leq 0,06$.

Fórmula de Beltaos

Beltaos (1980) apud Eiger (1991) utilizou o modelo unidimensional para descrever o processo de dispersão longitudinal decorrente da injeção pontual e instantânea de uma substância conservativa em um curso de água natural. Para a fase do processo em que a variância cresce linearmente com o tempo, Beltaos propôs a fórmula de previsão de E_L , reescrita no formato da equação de Fischer, do tipo

$$E_L = 1,14 \beta_B \frac{U^2 \cdot B^2}{u_* \cdot H} \quad (10)$$

onde β_B é um parâmetro que foi correlacionado com u_* / U , conforme mostrado na Figura 1.

Fórmula de Nikora & Sukhodolov

Nikora & Sukhodolov (1993) realizaram experimentos de campo para quantificar a dispersão longitudinal de pequenos cursos de água com vazões entre 0,013 e 4,7 m^3/s . Nos ensaios de campo, foi utilizada a solução de NaCl como traçador com uma concentração inicial de 200g/L. Para os ensaios em que a concentração máxima foi inversamente proporcional à \sqrt{t} e em que a variância cresceu linearmente com o tempo, os autores ajustaram um modelo para previsão de E_L da forma

$$\frac{E_L}{U \cdot B} = \alpha_{NS} \quad (11)$$

sendo α_{NS} um parâmetro razoavelmente constante. Para os experimentos de Nikora & Sukhodolov, o adimensional α_{NS} foi igual a 1,1.

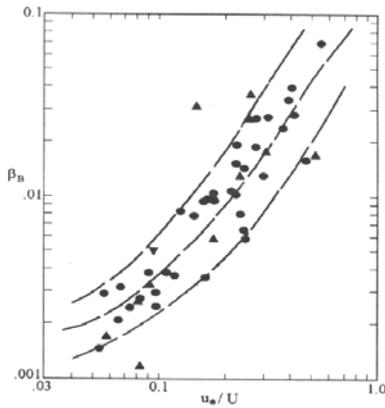


Figura 1 – Correlação do parâmetro β_B com o adimensional u_*/U para o modelo de Beltaos (1980), conforme Eiger (1991).

Modelo Híbrido de Vargas & Mellado

Vargas & Mellado (1994) propuseram um modelo híbrido de previsão de E_L para rios largos, pouco profundos e de baixas declividades, que combina as fórmulas de McQuivey & Keefer (1974) e Liu (1977). O modelo de Vargas & Mellado, no formato da equação de Fischer, é do tipo

$$E_L = \beta_{VM} \cdot \frac{U^2 \cdot B^2}{u_* \cdot H} \quad (12)$$

O coeficiente β_{VM} foi estimado em função do fator adimensional B/R_H mediante um modelo de regressão para valores de declividades compreendidas na faixa de 0,001 a 0,003 e para $18,27 \leq B/R_H \leq 152,15$:

$$E_L = 7,3867 \cdot \left(\frac{B}{R_H}\right)^{-1,8558} \cdot \frac{U^2 \cdot B^2}{u_* \cdot H} \quad (13)$$

com todas as unidades escritas no SI.

Fórmula de Koussis & Rodrigues-Mirasol

Koussis & Rodrigues-Mirasol (1998), apud Kasherfipour & Falconer (2002), a partir da teoria e equação propostas por Fischer e aplicando a lei de Karman, deduziram uma equação da forma

$$E_L = \phi \frac{u_* B^2}{H} \quad (14)$$

em unidades do SI. Da análise de regressão com base em 16 conjuntos de dados de campo, obtiveram $\phi = 0,6$.

Fórmula de Seo & Cheong

Seo & Cheong (1998), apud Kasherfipour & Falconer (2002), deduziram uma equação de estimativa de E_L com uso da análise dimensional e análise de regressão. Foram utilizados 59 conjuntos de dados de campo, medidos em 26 rios dos Estados Unidos. Dos 59 conjuntos de dados, 35 foram utilizados para estabelecer o modelo e os demais para validar a equação. Na forma adimensional, a equação de Seo & Cheong pode ser escrita como

$$\frac{E_L}{u_* H} = 5,915 \left(\frac{B}{H}\right)^{0,620} \left(\frac{U}{u_*}\right)^{1,428} \quad (15)$$

Fórmula de Kasherfipour & Falconer

Para estimar o coeficiente de dispersão longitudinal em rios, Kasherfipour & Falconer (2002) desenvolveram duas equações com base em três diferentes estudos de dispersão. De dados de campo de 30 rios dos Estados Unidos, todos retirados dos trabalhos de Fischer, de McQuivey & Keefer e de Seo & Cheong, uma primeira relação foi estabelecida na forma

$$E_L = 10,612 \cdot H \cdot U \cdot \left(\frac{U}{u_*}\right) \quad (16)$$

em unidades do SI.

A Eq.16 foi, então, comparada com as equações de Fischer, McQuivey & Keefer e Seo & Cheong e também com a fórmula de Koussis & Rodriguez-Mirasol. A comparação foi feita usando métodos estatísticos que demonstraram que o modelo representado pela Eq.16 é superior aos demais. Por tentativa e erro, a combinação linear de 70% da Eq.16 e 30% da equa-

ção de Seo & Cheong (Eq.15) resultou em um novo modelo, que foi apresentado na forma

$$E_L = \left[7,428 + 1,775 \cdot \left(\frac{B}{H} \right)^{0,62} \cdot \left(\frac{u_*}{U} \right)^{0,572} \right] \cdot H \cdot U \cdot \left(\frac{U}{u_*} \right) \quad (17)$$

em unidades do SI.

Kasherfipour & Falconer sugeriram, ainda, que melhores previsões de E_L para escoamentos em canais poderiam ser obtidas aplicando-se a Eq.16, para a relação $B/H > 50$, ou a Eq.17, para a relação $B/H < 50$.

METODOLOGIA

Para quantificar o coeficiente de dispersão longitudinal pelo método da propagação, foram utilizados dados gerados de ensaios de campo em que se empregou a técnica dos traçadores. De forma resumida, a técnica experimental adotada consistiu em injetar a substância traçadora em um ponto localizado no eixo do curso de água e utilizar, a jusante, dois pontos de amostragem selecionados em duas seções transversais ao escoamento. A amostragem do traçador em cada seção produziu os valores da concentração (C) em função do tempo (t) da passagem da nuvem que permitiram a construção das curvas de resposta do traçador para cada seção de amostragem (curvas C versus t).

Uma vez que em situações reais de campo sempre ocorre alguma perda do traçador, especialmente por adsorção, as concentrações foram convenientemente corrigidas. Para isso, em vez da massa do traçador verdadeiramente injetada, foi utilizada na correção os valores das massas recuperadas em cada uma das seções, $m_{rec}(x_i)$, definidas como

$$m_{rec}(x_i) = Q \int_{t_1}^{t_2} C(x_i, t) dt, \quad (18)$$

sendo t_1 e t_2 os tempos de chegada da frente e de passagem da cauda da nuvem pela estação de amostragem, respectivamente, e Q a vazão do escoamento que, necessariamente, deve manter-se constante durante todo o tempo de realização do ensaio de campo. No método da propagação, a correção das concentrações com base na massa do traçador recuperada, para cada estação de amostragem x_i , foi realizada dividindo-se os valores da concentração

medida, $C(x_i, t)$, pelo momento de ordem zero, ou área sob a curva de resposta, que se define como

$$A_C(x_i) = \int_{t_1}^{t_2} C(x_i, t) dt. \quad (19)$$

Essa divisão produz, então, uma nova variável normalizada,

$$y(x_i, t) = C(x_i, t) / A_C(x_i), \quad (20)$$

que na Eq.3 substitui a concentração. O uso da variável normalizada, em substituição às concentrações medidas nas seções de montante e jusante, torna as áreas sob as curvas $y(x_i, t)$ versus t iguais à unidade, à semelhança de uma função densidade de probabilidade.

Em todos os testes, o primeiro ponto de amostragem foi sempre escolhido a uma distância x_A do ponto da injeção do traçador superior ao comprimento L_0 do trecho de mistura (comprimento da zona advectiva). O comprimento L_0 é necessário para se promover a mistura completa do traçador e é estimado, segundo Fischer et al. (1979), como

$$L_0 = 0,1 \cdot \frac{U \cdot B^2}{\varepsilon_z} \quad (21)$$

em que ε_z é a difusividade turbulenta transversal, calculada segundo

$$\varepsilon_z = 0,60 \cdot u_* \cdot H \quad (22)$$

com L_0 e B em m, U e u_* em m/s e ε_z em m^2/s . Objetivou-se, assim, garantir a aplicabilidade do modelo *Fickiano*, pois somente após a zona advectiva pode-se esperar que o crescimento da variância da distribuição da concentração seja linear com o tempo. Importa destacar que a variância com crescimento linear refere-se à distribuição espacial da concentração e, no caso, as concentrações foram obtidas em seções fixas, ao longo do tempo. Assim, a checagem do comportamento exigido pelo modelo *Fickiano* só poderia ser feita a partir da introdução da hipótese

da nuvem congelada (transforma curvas de C versus t em curvas de C versus x), o que, contudo, introduziria uma razoável deformação: essa hipótese não é capaz de considerar o fato de que, ao passarem pela estação de amostragem, as partículas “mais velhas” sofrem maior dispersão do que as mais novas. Talvez, por isso, o crescimento linear desta estatística com o tempo seja condição raramente observada em estudos de campo. Ainda, embora os cálculos tenham sido realizados para as curvas de concentração versus tempo observadas no “eixo” do escoamento, as amostragens também se realizaram em pontos próximos às margens, como forma de se verificar o atendimento da condição de mistura completa.

Neste artigo, são considerados os resultados de 22 testes de campo em cursos de água naturais, cujas características são apresentadas na Tabela 1. Essa tabela traz, também, o valor do comprimento de mistura L_0 estimado para cada teste, conforme as Eqs. 21 e 22, bem como as distâncias à seção de injeção x_A e x_B dos pontos de amostragem de montante e de jusante, respectivamente. Para informar sobre a perda do traçador no trecho de teste, a Tabela 1 apresenta, ainda, valores da razão dos fatores de recuperação da massa do traçador: $R_{rec} = m_{rec}(x_B)/m_{rec}(x_A)$, com o numerador e o denominador calculados com a Eq. 18.

Os treze primeiros testes, ocorridos no período de setembro de 2000 a abril de 2001, foram realizados em pequenos cursos de água da região de Ouro Preto (MG), com vazões de 5,2L/s a 13,2L/s. Nestes testes, foram empregadas soluções de cloreto de sódio 10% como substância traçadora, medindo-se a condutividade elétrica do meio líquido como indicadora da concentração (Devens, 2006). Os testes 14 a 22, efetuados no período de novembro de 1993 a abril de 1995, referem-se a estudos em cursos de água da região de São Carlos (SP), com vazões entre 0,52m³/s e 11,25m³/s (Barbosa Jr., 1997). Nos testes 14 a 22, empregou-se como substância traçadora a rodamina-WT, solução 20%, adequadamente diluída antes do seu lançamento no curso de água. A propriedade de fluorescência da substância serviu como indicadora da concentração e foi medida com o emprego de fluorímetro de campo. Para os pequenos cursos de água dos testes 1 a 13, quando eram muito baixas as vazões, o cloreto de sódio pôde ser empregado pelo maior limite de detecção do condutivímetro.

Para a obtenção dos parâmetros físicos e hidrodinâmicos do escoamento, foram feitos levantamentos altimétricos e batimétricos, e para as medições da vazão empregou-se vertedor triangular de soleira fina (testes 1 a 13) e molinete hidrométrico

juntamente com técnica batimétrica para o método da meia-seção (testes 14 a 22). No caso dos estudos realizados por Barbosa Jr. (2007), os valores de E_L obtidos pelo método da propagação foram recalculados para considerar os dados normalizados, conforme as Eqs. 19 e 20.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A utilização de apenas duas estações de amostragem não permitiu a verificação da hipótese básica do modelo *Fickiano* de crescimento linear da variância da distribuição da concentração ao longo do tempo. Contudo, cuidou-se para que a distância da injeção ao primeiro ponto de amostragem fosse sempre superior ao comprimento L_0 , estimado pela Eq. 21, e necessário para a mistura completa do traçador. Esse procedimento mostrou-se suficiente para que as distribuições temporais da concentração se aproximassem razoavelmente da forma definida pela Eq. 2. A Figura 2 é uma ilustração do comportamento típico da concentração normalizada em função do tempo para duas estações de amostragem e traz, ainda, o resultado do ajuste produzido pela aplicação do método da propagação.

Construção do modelo de regressão para E_L

A análise dimensional foi empregada no tratamento do problema da mistura do traçador no escoamento natural da água. Além das propriedades físicas da água, massa específica (ρ) e viscosidade cinemática (ν), foram considerados ainda os parâmetros que afetam o coeficiente de dispersão longitudinal: raio hidráulico (R_H), largura do canal (B), velocidade média do escoamento (U) e velocidade de atrito (u_*). Utilizando-se o teorema-Pi de Buckingham, foi escrita a relação entre os grupos adimensionais

$$\frac{E_L}{u_* \cdot H} = f\left(\frac{B}{H}, \frac{u_*}{U}, Re_*\right) \quad (23)$$

Tabela 1 – Descrição sumária dos ensaios de campo com traçador: forma da injeção, tipo de traçador, fator de recuperação da massa e características geométricas e hidrodinâmicas dos cursos de água ensaiados.

Teste nº	Curso de água	data	Injeção / traçador	R _{rec} (-)	L ₀ (m)	x _A (m)	x _B (m)	Q (m ³ /s)	B (m)	U (m/s)	H (m)	S (m/m)
1	Córrego da Capela	01/09/2000	Instantânea/NaCl	0,91	20,8	81,0	205,5	0,00706	0,75	0,317	0,030	0,00772
2	Córrego da Capela	01/09/2000	Instantânea/NaCl	0,95	22,1	81,0	205,5	0,00706	0,75	0,321	0,029	0,00772
3	Córrego da Capela	12/10/2000	Instantânea/NaCl	0,95	17,7	81,0	205,5	0,00521	0,72	0,264	0,028	0,00772
4	Córrego da Capela	12/10/2000	contínua/NaCl	0,93	19,2	81,0	205,5	0,00521	0,72	0,272	0,027	0,00772
5	Córrego da Capela	12/10/2000	contínua/NaCl	0,94	13,6	81,0	205,5	0,00521	0,72	0,236	0,031	0,00772
6	Córrego da Capela	12/10/2000	contínua/NaCl	0,92	12,5	81,0	205,5	0,00521	0,72	0,227	0,032	0,00772
7	Córrego da Capela	17/02/2001	instantânea/NaCl	0,94	42,0	122,0	246,5	0,01317	2,20	0,317	0,019	0,00552
8	Córrego da Capela	17/02/2001	instantânea/NaCl	0,91	41,8	122,0	246,5	0,01317	2,20	0,316	0,019	0,00552
9	Córrego da Capela	17/02/2001	instantânea/NaCl	0,96	41,3	122,0	246,5	0,01317	2,20	0,312	0,019	0,00552
10	Córrego da Capela	17/02/2001	instantânea/NaCl	0,94	48,8	122,0	246,5	0,01317	2,20	0,340	0,018	0,00552
11	Córrego da Capela	17/02/2001	instantânea/NaCl	0,96	47,5	122,0	246,5	0,01317	2,20	0,331	0,018	0,00552
12	Córrego do Fundão	07/04/2001	instantânea/NaCl	0,87	4,5	60,0	164,0	0,01134	1,40	0,094	0,086	0,00745
13	Córrego do Fundão	07/04/2001	instantânea/NaCl	0,89	3,3	60,0	164,0	0,01134	1,40	0,083	0,098	0,00745
14	Cór. Laranja Azeda	09/11/1993	contínua/rodamina	0,94	9,8	670,0	1860,0	0,68	4,0	0,281	0,61	0,00265
15	Cór. Laranja Azeda	26/04/1994	contínua/rodamina	0,87	9,6	670,0	1860,0	0,70	4,0	0,282	0,62	0,00265
16	Cór. Laranja Azeda	21/06/1994	instantânea/rodamina	0,97	11,6	320,0	1510,0	0,52	4,0	0,255	0,51	0,00265
17	Cor. Laranja Azeda	06/03/1995	instantânea/rodamina	0,90	9,5	340,0	1510,0	1,20	4,5	0,329	0,81	0,00265
18	Ribeirão do Feijão	22/10/1993	contínua/rodamina	0,98	116,1	410,0	910,0	2,64	10	0,509	0,52	0,00387
19	Ribeirão do Feijão	16/05/1994	instantânea/rodamina	0,99	111,9	410,0	910,0	2,80	10	0,519	0,54	0,00387
20	Ribeirão do Feijão	11/04/1995	instantânea/rodamina	0,93	118,1	410,0	910,0	4,30	11	0,598	0,65	0,00387
21	Rio Jacaré-Guacu	17/08/1994	instantânea/rodamina	0,89	244,6	750,0	2250,0	11,25	20	0,412	1,37	0,0005
22	Rio Jacaré-Guacu	20/09/1994	instantânea/rodamina	0,87	100,2	750,0	2250,0	9,00	20	0,400	1,13	0,0005

onde $Re_* = u_* H / \nu$, e com o raio hidráulico, numa aproximação, adotado como igual à profundidade média do escoamento. A relação de dependência entre os grupos adimensionais foi, então, escrita na forma de uma lei de potência, segundo

$$\frac{E_L}{u_* \cdot H} = K \cdot \left(\frac{B}{H}\right)^a \cdot \left(\frac{u_*}{U}\right)^b \cdot (Re_*)^c \quad (24)$$

onde K, a, b e c são parâmetros obtidos da análise de regressão mediante o ajuste do modelo aos dados de campo. Para a obtenção dos parâmetros do modelo, foram empregados os resultados dos cálculos das grandezas adimensionais conforme a Tabela 2.

Com base nos dados da Tabela 2 e utilizando a ferramenta computacional Origin 6.0, aplicou-se a análise numérica de regressão múltipla para ajustar, com um coeficiente de determinação $r^2 = 0,986$, o modelo da forma

$$\frac{E_L}{u_* \cdot H} = 5,72 \left(\frac{B}{H}\right)^{1,031} \left(\frac{u_*}{U}\right)^{-0,774} \left(\frac{u_* H}{\nu}\right)^{-0,155} \quad (25)$$

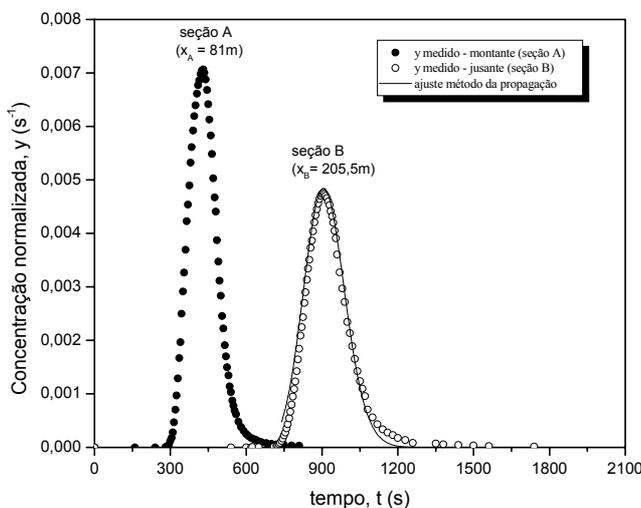


Figura 2 – Concentrações normalizadas, y, nas estações de montante (A) e jusante (B) e valores gerados pelo método da propagação para a seção de jusante (linha cheia), ao longo do tempo: Teste 5, Córrego da Capela, em 12/10/2000

Para o coeficiente de viscosidade cinemática da água $\nu \cong 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e para u_* estimado pela Eq.7, a Eq.25 foi reescrita de modo a explicitar E_L em termos de quantidades de fácil mensuração:

$$E_L = 0,729 \times U^{0,774} \times B^{1,031} \times S^{0,036} \times H^{-0,151} \quad (26)$$

com E_L em m^2/s , U em m/s , S em m/m e B e H em m.

Comparação das fórmulas práticas de determinação de E_L

As previsões realizadas com as fórmulas práticas para o coeficiente de dispersão longitudinal são apresentadas na Tabela 3, juntamente com os valores estimados pelo método da propagação (identificados como $E_{L(\text{medido})}$). Para avaliar a qualidade das previsões, a tabela também apresenta os resíduos médios quadráticos (RMQ) e os desvios médios relativos quadráticos (DMRQ), obtidos segundo as expressões:

$$RMQ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{L(\text{fórmula})} - E_{L(\text{medido})})^2} \quad (27)$$

E

$$DMRQ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_{L(\text{fórmula})} - E_{L(\text{medido})}}{E_{L(\text{medido})}} \right)^2} \quad (28)$$

onde N é o número de testes.

Das onze fórmulas comparadas, incluído entre elas o modelo proposto no presente estudo, os resultados dos resíduos médios (valores RMQ e DMRQ) da Tabela 3 sugerem a superioridade do modelo aqui proposto em relação aos demais, seguido pelos modelos de Nikora & Sukhodolov, Elder, Beltaos e Liu.

Ainda como forma de expressar os resultados dos estudos comparativos das fórmulas práticas de previsão de E_L , a Figura 3 utiliza a razão $E_{L(\text{fórmula})} / E_{L(\text{medido})}$ como critério de comparação. Na figura, as melhores previsões são aquelas cujos valores estão distribuídos mais próximos da relação

Tabela 2 – Descrição sumária dos resultados de cálculo das grandezas adimensionais para os corpos de água estudados

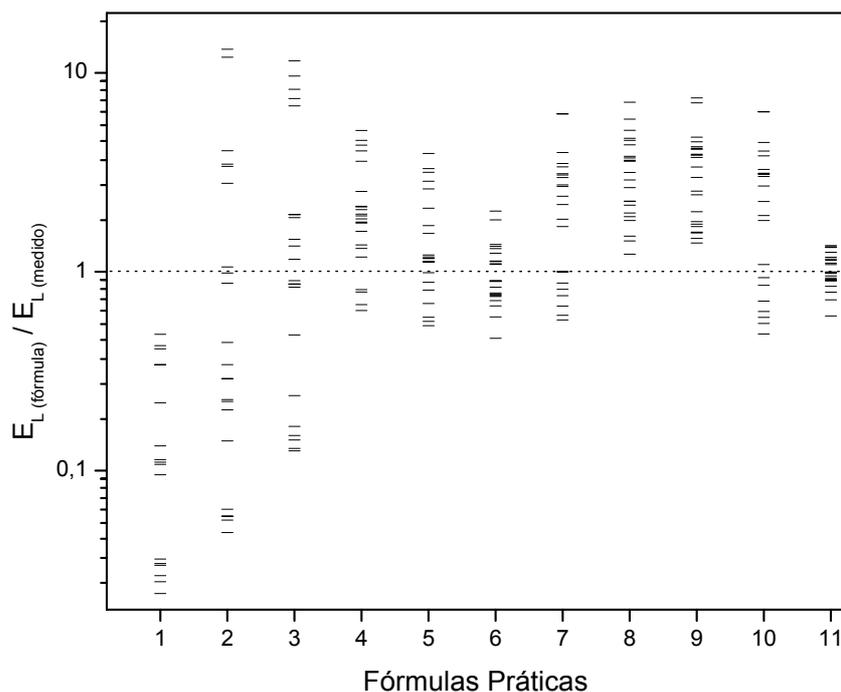
Teste n°	Curso de água	Data	Forma da injeção do traçador	$\frac{E_L}{(u_*H)}$	$\frac{B}{H}$	$\frac{u_*}{U}$	$Re_* = \frac{u_*H}{\nu}$
1	Capela	01/09/2000	instantânea	173,7	25,57	0,15	1393,5
2	Capela	01/09/2000	instantânea	177,6	25,88	0,15	1368,6
3	Capela	12/10/2000	instantânea	214,6	26,01	0,17	1258,1
4	Capela	12/10/2000	contínua	200,1	26,85	0,17	1199,5
5	Capela	12/10/2000	contínua	165,1	23,30	0,20	1483,7
6	Capela	12/10/2000	contínua	246,4	22,43	0,22	1570,3
7	Capela	17/02/2001	instantânea	1770,7	116,24	0,10	604,3
8	Capela	17/02/2001	instantânea	2129,8	116,21	0,10	605,7
9	Capela	17/02/2001	instantânea	1804,9	114,27	0,10	620,0
10	Capela	17/02/2001	instantânea	1815,8	124,83	0,091	543,0
11	Capela	17/02/2001	instantânea	1887,2	121,44	0,094	565,9
12	Fundão	07/04/2001	instantânea	27,0	16,23	0,845	6846,6
13	Fundão	07/04/2001	instantânea	17,3	14,34	1,02	8245,5
14	Laranja Azeda	09/11/1993	contínua	14,5	6,61	0,45	75831,5
15	Laranja Azeda	26/04/1994	contínua	17,5	6,45	0,45	78780,6
16	Laranja Azeda	21/06/1994	instantânea	13,9	7,85	0,45	58659,8
17	Laranja Azeda	06/03/1995	instantânea	12,3	5,55	0,44	117596,7
18	Feijão	22/10/1993	contínua	62,1	19,28	0,28	72744,1
19	Feijão	16/05/1994	instantânea	55,2	18,54	0,28	77171,1
20	Feijão	11/04/1995	instantânea	53,8	16,83	0,26	102927,3
21	Jacaré Guaçu	17/08/1994	instantânea	44,5	14,65	0,20	111669,9
22	Jacaré Guaçu	20/09/1994	instantânea	52,2	17,78	0,19	83527,0

$E_{L(\text{fórmula})} / E_{L(\text{medido})} = 1$. Novamente, fica evidenciada a superioridade do modelo aqui proposto, seguido do modelo de Nikora & Sukhodolov e de Beltaos. A Figura 3 e a Tabela 3 mostram, ainda, que: a) a equação de Elder subestimou fortemente o coeficiente de dispersão longitudinal, o que já era esperado uma vez que esta equação foi desenvolvida de estudos em calhas de laboratório; b) as equações de Koussis & Rodrigues-Mirasol e de Seo & Cheong, ao contrário, sempre superestimaram E_L ; c) Fischer, Vargas & Mellado e Kasherfipour & Falconer, embora tenham produzido E_L com razoáveis aproximações dos valores medidos em alguns casos, ainda fazem previsões afetadas de um fator de ordem 10. A equação de Vargas & Mellado foi aplicada para valores de declividade fora da faixa limite da Eq.13 (exceto nos casos dos testes 14 a 17 no ribeirão Laranja Azeda), mas, ainda assim, as previsões foram razoáveis para os menores cursos d'água (testes 1 a 13); d) Os maiores desvios foram encontrados com

o uso do modelo de McQuivey & Keefer que subestimou E_L para os menores cursos d'água (testes 1 a 13), onde o número de Froude quase sempre foi inferior ao limite estabelecido para a aplicação da Eq.5. Para os demais testes, à exceção de dois realizados no ribeirão do Feijão, a equação de McQuivey & Keefer sempre superestimou E_L ; e) A equação de Liu superestimou E_L em 18 dos 22 testes realizados e em apenas dois testes os valores de β_L estiveram fora da faixa limite de aplicação da Eq.9; f) O modelo de Nikora & Sukhodolov produziu boas previsões mesmo naqueles casos em que as vazões foram inferiores às observadas pelos autores (testes 1 a 6 e testes 7 e 8). Em dois testes (testes 21 e 22 no rio Jacaré Guaçu), encontraram-se as piores previsões, casos em que as vazões foram superiores às observadas por Nikora & Sukhodolov.

Tabela 3 – Coeficientes de dispersão longitudinal medidos diretamente (método da propagação) e calculados pelas fórmulas práticas

Teste n ^a	Coeficiente de dispersão longitudinal, E _L (m ² /s)											
	Valor Medido	Elder (Eq.4)	McQuivey & Keffer (Eq.5)	Fischer (Eq.6)	Liu (Eq.8)	Beltaos (Eq.10)	Nikora & Sukhodolov (Eq.11)	Vargas & Mellado (Eq.13)	Koussis & Rodrigues- Mirasol (Eq.14)	Seo & Cheong (Eq.15)	Kasherfipour & Falconer (Eqs.16 e 17)	Modelo de regressão (Eq.26)
1	0,242	0,0083	0,070	0,452	0,425	0,272	0,263	0,741	0,547	0,933	0,747	0,321
2	0,243	0,0081	0,070	0,471	0,431	0,283	0,266	0,756	0,550	0,947	0,760	0,324
3	0,270	0,0075	0,055	0,312	0,368	0,239	0,208	0,496	0,511	0,686	0,517	0,266
4	0,240	0,0071	0,055	0,349	0,383	0,267	0,215	0,522	0,519	0,714	0,541	0,274
5	0,246	0,0088	0,055	0,212	0,321	0,198	0,186	0,414	0,483	0,597	0,443	0,240
6	0,387	0,0093	0,055	0,186	0,306	0,218	0,179	0,389	0,474	0,569	0,420	0,232
7	1,070	0,0036	0,063	8,833	4,628	3,387	0,766	0,872	4,899	1,805	0,631	1,019
8	1,290	0,0036	0,063	8,785	4,628	3,369	0,765	0,867	4,908	1,800	0,628	1,018
9	1,119	0,0037	0,063	8,321	4,531	3,191	0,753	0,847	4,857	1,767	0,615	1,003
10	0,986	0,0032	0,063	11,337	5,060	3,877	0,823	0,980	5,077	1,975	0,702	1,089
11	1,068	0,0034	0,063	10,294	4,888	3,521	0,801	0,937	5,007	1,908	0,673	1,061
12	0,185	0,0406	0,063	0,028	0,353	0,288	0,145	0,106	1,082	0,290	0,158	0,201
13	0,143	0,0489	0,063	0,018	0,302	0,298	0,128	0,086	1,017	0,248	0,133	0,179
14	1,099	0,4497	3,721	0,183	0,893	0,760	1,236	3,696	1,989	4,582	4,206	0,996
15	1,376	0,4672	3,830	0,178	0,878	0,736	1,241	3,757	1,964	4,625	4,275	0,995
16	0,818	0,3479	2,845	0,195	0,968	0,809	1,122	2,864	2,167	3,877	3,303	0,948
17	1,440	0,6973	5,836	0,205	0,983	0,850	1,629	5,719	2,175	6,481	6,437	1,215
18	4,520	0,4314	3,957	3,918	9,273	5,278	5,599	10,844	16,225	16,980	12,212	4,207
19	4,260	0,4576	4,196	3,839	9,091	5,173	5,709	11,433	15,908	17,572	12,820	4,246
20	5,540	0,6104	5,859	4,624	10,224	6,230	7,236	16,476	17,487	23,562	18,098	5,078
21	4,970	0,6622	65,250	6,688	9,681	5,892	9,064	30,823	14,378	35,108	31,582	5,868
22	4,360	0,4953	52,200	8,428	11,029	7,425	8,800	27,119	15,839	32,593	27,789	5,905
RMQ(m²/s)	---	2,11	16,47	4,18	3,03	1,37	1,40	8,07	5,70	10,49	8,53	0,45
DMRQ	---	0,878	3,697	3,814	1,751	1,117	0,375	2,116	2,722	2,837	2,298	0,213



1- Elder,1959; 2- McQuivey & Keefer,1974; 3- Fischer,1975; 4- Liu,1977; 5- Beltaos,1980
 6- Nikora & Sukhodolov,1993; 7- Vargas & Mellado,1994; 8- Koussis & Rodrigues-Mirasol, 1998;
 9- Seo & Cheong,1998; 10- Kasherfipour & Falconer, 2002; 11- Modelo da Eq.26.

Figura 3 – Valores da razão do coeficiente de dispersão estimado pelas fórmulas práticas e medido diretamente pelo método da propagação para cada uma das onze fórmulas comparadas

Tabela 4 - Descrição sumária dos testes de campo com traçador e resultados dos cálculos das grandezas adimensionais para os estudos realizados no ribeirão Caldas

Teste nº	Curso de água	Data	Injeção	$\frac{E_L}{(u_*H)}$	$\frac{B}{H}$	$\frac{u_*}{U}$	$Re_* = \frac{u_*H}{\nu}$
1	Caldas – Trecho 1-2	30/08/1994	contínua	207,3	56,88	0,189	9600
2	Caldas – Trecho 2-3	30/08/1994	contínua	511,1	50,56	0,162	8820
3	Caldas – Trecho 1-2	21/03/1995	instantânea	204,5	25,00	0,124	37600
4	Caldas – Trecho 1-2	27/06/1995	instantânea	683,8	55,56	0,143	11700
5	Caldas – Trecho 2-3	27/06/1995	instantânea	630,3	47,62	0,140	11550

Tabela 5 – Características do escoamento e coeficientes de dispersão longitudinal obtidos diretamente pelo método da propagação e calculados pela Eq.26 para os testes realizados no ribeirão Caldas

Teste nº	Q (m³/s)	U (m/s)	B (m)	H (m)	S (m/m)	$E_{L(medido)}$ (m²/s)	E_L (Eq.26) (m²/s)
1	0,45	0,317	9,1	0,156	0,00231	1,99	3,22
2	0,48	0,302	9,1	0,175	0,00143	4,51	3,00
3	3,00	0,760	10,0	0,395	0,00231	7,69	5,92
4	0,80	0,456	10,0	0,175	0,00231	8,00	4,57
5	0,84	0,393	10,0	0,214	0,00143	7,28	3,91
						RMQ (m²/s)	2,45
						DMRQ	0,435

Conforme Rutherford (1994), o uso de técnica inapropriada de quantificação do coeficiente de dispersão é fator responsável pela imprecisão nos resultados produzidos pelas fórmulas práticas. Barbosa Jr. et al. (2005a, 2005b) compararam várias técnicas de estimativa do coeficiente de dispersão longitudinal para concluir que os resultados por elas produzidos são, em muitos casos, bastante discordantes. Rutherford (1994) menciona, ainda, como fonte de estimativas pobres do coeficiente E_L a ocorrência de grandes perdas do traçador, sem a conveniente correção, ou o fato das medidas serem feitas dentro da zona advectiva. Há, também, que se considerar, segundo Rutherford, as incertezas presentes nas próprias medidas de H , B e u_* , parâmetros que raramente são estimados de forma acurada por exigir meticuloso trabalho de campo.

Aplicação do modelo de regressão da Eq. 26

Com intuito de validar o modelo de regressão proposto na forma das Eqs. 25 e 26, o mesmo foi aplicado a cinco conjuntos de dados de campo (Barbosa Jr., 1997) gerados de estudos em trechos do ribeirão Caldas, na região urbana da cidade de Poços de Caldas – MG. A Tabela 4 apresenta um resumo dos testes em termos das grandezas adimensionais consideradas relevantes.

Na Tabela 5 são comparados os valores de E_L gerados pela aplicação do método da propagação para os cinco testes realizados no ribeirão Caldas (identificados como $E_{L(\text{medido})}$) com aqueles previstos pelo modelo da Eq.26. Nota-se que os valores de RMQ e DMRQ são iguais a 2,45 e 0,435, respectivamente, o que sugere que o novo modelo foi capaz de prever razoavelmente bem o coeficiente de dispersão longitudinal.

Os gráficos da Figura 4 mostram, na forma linearizada por transformações logarítmicas (linhas pontilhadas), o modelo da Eq.25 com $\log [E_L/(u_*H)]$ em ordenadas e os logaritmos dos adimensionais B/H , u_*/U e u_*H/ν em abscissas, juntamente com os valores desses adimensionais calculados com base nos dados dos testes de campo, conforme as Tabelas 2 e 4.

Os gráficos, além de ilustrarem a qualidade do ajuste da Eq.25, sugerem que o modelo aqui proposto é razoavelmente validado para o trecho

urbano do ribeirão Caldas. A linha de tendência tem boa aderência aos dados quando a comparação é feita com os logaritmos de B/H ou u_*/U . Embora exista uma maior dispersão dos resultados quando $\log(Re_*)$ encontra-se nas abscissas, os espalhamentos observados acompanham a tendência da base de dados utilizada na construção do modelo de regressão da Eq.25. Os resultados dos desvios em termos de RMQ e DMRQ contidos na Tabela 5 confirmam a razoável capacidade de previsão de E_L através do modelo proposto, mesmo em um canal urbano.

CONCLUSÕES

Os coeficientes de dispersão longitudinal obtidos por dez fórmulas práticas de estimativa foram comparados com aqueles obtidos diretamente pelo método da propagação, com base em 22 testes de campo realizados em pequenos cursos d'água naturais. As diferenças acentuadas nas estimativas produzidas pelas diferentes fórmulas práticas refletem a dificuldade de se estabelecer um modelo simples de previsão de E_L que seja capaz de considerar todas as características geométricas e hidrodinâmicas relevantes dos cursos de água naturais que, em geral, são muito irregulares. Sugere-se, ainda, que as diferenças decorram, em parte, do fato de nem todas as fórmulas conterem adequadamente os parâmetros intervenientes no processo de transporte de massa.

Conforme os resultados mostrados na Tabela 3 e também visualizados na Figura 3, as comparações sugerem que o modelo de Nikora & Sukhodolov, dado pela Eq.11 e cuja forma é extremamente simples, é superior aos demais. Outros modelos, inclusive de uso bastante frequente, ofereceram resultados afetados de erros de ordem 10, ou até superior. Assim, a grande discrepância dos resultados das previsões de E_L pelas várias fórmulas práticas oferece um alerta quanto à necessidade de adoção de extremo cuidado na escolha de uma dada fórmula para estimar o coeficiente de dispersão, especialmente para aplicação em pequenos cursos de água.

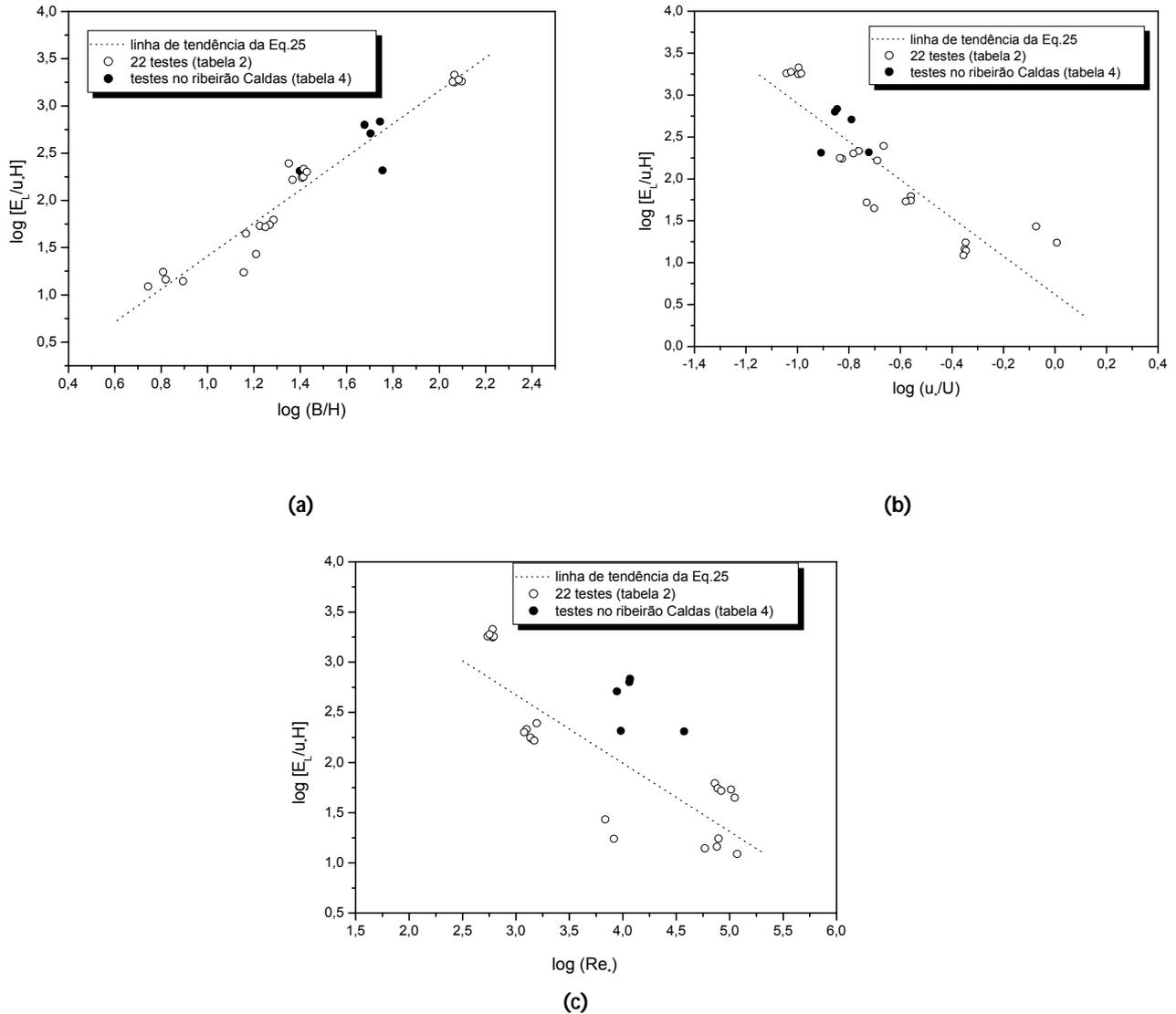


Figura 4 – Gráficos dos logaritmos do coeficiente de dispersão adimensional em função dos logaritmos dos adimensionais (a) B/H; (b) u_*/U e (c) Re_* .

Tendo como objetivo complementar oferecer um modelo simples de estimativa de E_L , útil em estudos voltados para a análise do impacto de poluentes em pequenos cursos de água naturais, a análise dimensional foi utilizada para identificar os grupos adimensionais relevantes no processo de transporte de massa.

Em termos adimensionais, foi estabelecido que $E_L/(u_*H) = f(B/H, u_*/U, u_*H/\nu)$ e, na forma de uma lei de potência, foi obtido o modelo de regressão múltipla com base nos dados gerados dos 22 testes de campo. Esse modelo também foi escrito em termos das quantidades facilmente mensuráveis do

escoamento, na forma da Eq.26: $E_L = 0,729 \times U^{0,774} \times B^{1,031} \times S^{0,036} \times H^{-0,151}$. A qualidade do ajuste da regressão, estabelecida pelo coeficiente de determinação ($r^2 = 0,98$), pelo resíduo médio quadrático (RMQ = 0,45) e pelo desvio médio relativo quadrático (DMRQ = 0,21), além de ilustrada graficamente pela Figura 4, sugere que a equação proposta é adequada para a previsão de E_L em pequenos cursos de água naturais.

Tendo em vista o uso prático das Eqs. 25 ou 26 em estudos voltados para o controle da qualidade de água em pequenos cursos de água naturais, recomenda-se observar as condições de escoamento similares às dos corpos de água aqui estudados, res-

peitando-se, respectivamente, os seguintes limites para a declividade, a profundidade média, a largura à superfície e a velocidade média do escoamento: $0,50 \text{ m/km} \leq S \leq 7,72 \text{ m/km}$, $0,02 \text{ m} \leq H \leq 1,37 \text{ m}$, $0,72 \text{ m} \leq B \leq 20,0 \text{ m}$ e $0,083 \text{ m/s} \leq U \leq 0,59 \text{ m/s}$.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA Jr., A.R. **Uso de Traçadores na Determinação de Parâmetros de Qualidade em Escoamentos Naturais da Água**. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 1997.
- BARBOSA Jr., A.R. et al. Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos de água naturais. Parte 1 - Fundamentos teóricos. **Revista Escola de Minas**, 58(1): p. 27-32. 2005.
- BARBOSA Jr., A.R. et al. Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos de água naturais. Parte 2 - Aplicação e comparação dos métodos. **Revista Escola de Minas**, 58(2): p. 139-145. 2005.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resoluções do Conama: resoluções vigentes publicadas entre julho de 1984 e novembro de 2008** – 2ª ed. / Conselho Nacional do Meio Ambiente. – Brasília, 2008.
- DEVENS, J.A. **Quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal em pequenos cursos de água naturais com o uso de traçador ambientalmente neutro**. Dissertação - Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2006.
- EIGER, S. **Qualidade da Água em Rios e Estuários**. In: PORTO, R.L. Hidrologia Ambiental. Coleção Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v.3. São Paulo: USP, 1991.
- ELDER, J.W. The dispersion of a marked fluid in turbulent shear flow. **Journal of Fluid Mechanics**, 5 (4): p. 544-560, 1959.
- FISCHER, H.B. The Dispersion Predictions in Natural Streams. Proc. of American Society of Civil Engineers, **Journal of Sanitary Engineering Division**, vol. 94, n. SA5, pp. 927-943, 1968.
- FISCHER, H.B. et al. **Mixing in Inland and Coastal Waters**. N. York, Academic Press, 1979.
- FRENCH, R. H. **Open-Chanel Hydraulics**. McGraw-Hill, Inc., USA, 1985. 705p.
- KASHEFIPOUR, S.M.; FALCONER, R.A. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels. **Water Research**, USA, 36: p. 1956-1608, 2002.
- LIU, H. Predicting Dispersion Coefficient of Streams. **Journal of the Environmental Engineering Division**, 101(3): p.59-69, 1977.
- MCQUIVEY, R.S.; KEEFER, T.N. Simple method for predicting dispersion in streams. **Journal of the Environmental Engineering Division**. In: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 100(4): p. 997-1011, 1974.
- NIKORA, V.I. & SUKHODOLOV, A.N. Longitudinal Dispersion of a Conservative Pollutants in Small Rivers. **Proceedings of the First International Conference on Hydro-Science and-Engineering**. Washington, DC, USA, pp.379-384, 1993.
- RUTHERFORD, J.C. **River Mixing**. West Sussex, England. John Wiley and Sons Ltd, 1994.
- VARGAS, J.B.; MELLADO, M. CH. **Modelo de estimacion del coeficiente de dispersion longitudinal em rios anchos, de profundidad y pendiente escasa**. In: XVI Congresso Latino Americano de Hidráulica de Santiago, Chile, p. 385-396, 1994.

Empirical and Semi Empirical Models for Longitudinal Dispersion Coefficient in Small Natural Streams

ABSTRACT

Methods based on the use of empirical equations to predict longitudinal dispersion coefficients in small natural streams are discussed in this paper. Ten equations for the prediction of dispersion coefficients are compared. The comparison is based on the results of 22 field studies for which the dispersion coefficients are directly measured using natural tracers. The technique for this direct measurement is based on a methodology derived from the classical Fickian model. Dimensional analysis is used to build up relevant mass-transport non-dimensional groups, and to produce an alternative mathematical model for the longitudinal dispersion coefficient. This model is calibrated using the multiple regression technique, and it is validated upon comparison with new data from a field study in an urban canal.

Keywords: *longitudinal dispersion, tracer, water quality.*