

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO LONGITUDINAL EM CANAL EXPERIMENTAL A PARTIR DE EQUAÇÕES EMPÍRICAS

PEREIRA, Paulo Eduardo Jorge¹; FAIS, Laura Maria Canno Ferreira^{2}; RIBEIRO, Lubienska Cristina Lucas Jaquiê³*

Resumo – Um dos parâmetros para se avaliar a dispersão dos efluentes em um curso d'água é o coeficiente de dispersão longitudinal, que varia em função das características do canal e do escoamento. Este coeficiente mede a capacidade de um curso d'água dispersar os poluentes ao longo da sua seção longitudinal, e depende de vários fatores. Um dos fatores que podem influenciar no coeficiente de dispersão longitudinal é a rugosidade do canal, já que estas afetam diretamente na turbulência do canal, pois favorecem o aparecimento de vórtices que aumenta a difusão do efluente. O coeficiente de dispersão longitudinal pode ser determinado através de modelos matemáticos, ou fórmulas empíricas. Considerando que os cursos d'água não possuem características uniformes, muitas vezes é também necessário o estudo em modelo físico. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo determinar o coeficiente de dispersão longitudinal em um canal experimental, avaliando a influência da rugosidade do canal na determinação do coeficiente de dispersão, através de estudo em modelo físico. A partir dos resultados observou-se a diminuição do coeficiente com o aumento da rugosidade.

Palavras-Chave – Rugosidade, coeficiente de dispersão longitudinal, estudo experimental.

DETERMINATION OF THE LONGITUDINAL COEFFICIENT OF DISPERSION IN EXPERIMENTAL CHANNEL FROM EMPIRICAL EQUATIONS

Abstract – One of the parameters to evaluate the dispersion of the effluents in rivers is the coefficient of longitudinal dispersion, which varies according to the characteristics of the channel and the flow. This coefficient measures the ability of a river to disperse the pollutants along its longitudinal section, and depends on several factors. One of the factors that can influence the longitudinal dispersion coefficient is the channel roughness, since this affect directly in the channel turbulence, because they favor the appearance of vortices that increases the diffusion of the effluent. The coefficient of longitudinal dispersion can be determined by mathematical models, or empirical formulas. Considering that water courses do not have uniform characteristics, it is often necessary to study them in a physical model. The objective of this paper is to calculate the longitudinal coefficient of dispersion in a experimental channel through empirical equations and evaluate the influence of the channel roughness in the coefficient, through the study in physical model. From the results it was observed the decrease of the coefficient with the increase of roughness.

Keywords – roughness, longitudinal coefficient of dispersion, experimental study

¹ *Graduando em Engenharia Ambiental na Faculdade de Tecnologia da Unicamp, pereira.pauloe@hotmail.com.

² Professor Doutor, na Faculdade de Tecnologia da Unicamp, laura@ft.unicamp.br.

³ Professor Doutor na Faculdade de Tecnologia da Unicamp, lubi@ft.unicamp.br

1. INTRODUÇÃO

Os escoamentos podem receber diversas classificações hidráulicas e segundo Porto (2006), cada uma possui características e funções distintas. A maior parte dos escoamentos de água é considerado turbulento, pois as partículas do líquido movem-se aleatoriamente, produzindo uma transferência na quantidade de movimento entre regiões de massa líquida.

Um dos parâmetros para se avaliar a dispersão dos efluentes em um curso d'água é o coeficiente de dispersão longitudinal, que varia em função das características do canal e do escoamento. Este coeficiente mede a capacidade de um curso d'água dispersar os poluentes ao longo da sua seção longitudinal.

Para Devens (2006), a dispersão é o efeito da ação conjunta da difusão molecular e da advecção diferenciada. A primeira pode ser definida como o espalhamento das partículas do constituinte decorrente da agitação térmica do fluido, mesmo que o meio apresente velocidade média nula, e ocorre da região de maior concentração para uma região de menor concentração. A segunda relaciona-se com a ocorrência do fenômeno do cisalhamento, ou seja, quando camadas adjacentes de um fluido apresentam deslocamento relativo entre si, ou seja, existem gradientes transversais de velocidade, isto é, perfis não uniformes de velocidade. A autora afirma ainda que os métodos de determinação do coeficiente por meio de equações empíricas relacionam o coeficiente com quantidades físicas de fácil obtenção ou disponibilidade, como profundidade média, largura, declividade e velocidade média ou vazão do escoamento.

Segundo Machado (2006), o coeficiente de dispersão é influenciado pela presença de irregularidades no leito e depende de parâmetros geométricos do canal, tais como largura, profundidade, rugosidade, além das características do escoamento, tais como vazão, e, principalmente, do regime de escoamento. Estes fatores não são facilmente determináveis e ainda são de difícil relação, o que dificulta a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal. É importante considerar o efeito da turbulência no escoamento, visto que esta aumenta o poder de difusão, melhorando o transporte do poluente no curso d'água.

Vários autores vêm realizando trabalhos para o estudo do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água. Podem ser citados Ribeiro *et. al* (2010), Costa (2011), Vidal *et. al* (2015), Lopes (2016), dentre outros.

Este trabalho tem como objetivo verificar a influência da rugosidade no coeficiente de dispersão longitudinal de um canal, determinado a partir de equações empíricas. Para isso, foi realizado um estudo experimental no canal didático do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Tecnologia da Unicamp.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo experimental foi realizado no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em um canal para experimentos hidráulicos da Terzi – Metalúrgica Industrial Ltda., de dimensões 2,90m x 0,10m x 0,3m.

Para a simulação de diferentes rugosidades, foram colocados no fundo do canal placas de borracha, dispostas transversalmente e igualmente espaçadas, ao longo de todo o comprimento do canal, conforme Figura 1. As placas tinham 0,05m de comprimento, 0,10m de largura, e espaçamento entre elas de 0,3625m. Os ensaios foram feitos com a altura das borrachas igual a 0,005m e 0,015m e vazão igual a 0,0104m³/s.

Para cada ensaio determinou-se a rugosidade a partir da Equação de Manning, expressa por:

$$Q = \frac{1}{n} \sqrt{I_0} A \cdot R_h^{2/3} \quad (1)$$

Sendo: n a rugosidade do canal; Q a vazão do canal (m^3/s); I_0 a declividade de fundo do canal (m/m); A a área da seção transversal do canal (m^2); $R_h = A/P$ o raio hidráulico do canal, sendo P o perímetro molhado (m).

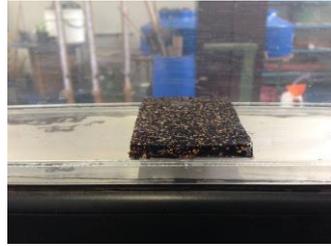


Figura 1 -Macro Rugosidade dentro do Canal (Arquivo pessoal)

Foi realizado teste com um traçador para avaliar a influência da rugosidade na pluma de dispersão ao longo do canal. Segundo Devens (2006), o traçador é utilizado para simular o comportamento de um poluente em um curso d'água, sendo as substâncias solúveis (como as fluorescentes e salinas) as mais usadas para os estudos de dispersão. Sendo assim, o traçador escolhido foi o cloreto de sódio (NaCl) tendo em vista seu baixo custo de aquisição, facilidade para quantificação e inexistência de toxicidade.

O método utilizado no teste de dispersão realizado no Laboratório de Hidráulica foi o mesmo adotado por Lopes (2016) e Akiyama (2016). Foram coletadas amostras em três seções ao longo do canal (denominadas P_1 , P_2 e P_3), a distâncias de 0,55m; 1,56m e 2,75m a partir do início do canal. Em cada seção, foram feitas medições em três profundidades do escoamento (medidas a partir do fundo do canal), sendo estas chamadas de P_C (0,20m), P_M (0,13m) e P_B (0,06m).

A partir dos ensaios, foram lidas as alturas da lâmina d'água para determinação dos parâmetros geométricos do canal e do coeficiente de rugosidade, para a condição natural do canal, e com as macro rugosidades coladas ao fundo. As leituras foram feitas em várias seções ao longo do comprimento do canal

Por fim, os resultados obtidos foram utilizados para se determinar o coeficiente de dispersão longitudinal (E_L) a partir das Equações empíricas 2 a 5, mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Equações empíricas para determinação do coeficiente de dispersão longitudinal (E_L)

Autores	Fórmulas Empíricas
Seo e Chong (1998)	$E_L / (H \cdot u^*) = 5,915 \cdot \left(\frac{B}{H}\right)^{0,62} \cdot \left(\frac{U}{u^*}\right)^{1,428}$ (2)
Nikora e Sukhodolov (1993)	$E_L / (U \cdot B) = \alpha_{ns}$ (3)
Kashesfipour e Falconer (2002)	$E_L = 10,612 \cdot H \cdot U \cdot \frac{U}{u^*}$ (4)
Devens(2006)	$E_L = 3,55 \cdot 10^{-4} \cdot \{(U^{-0,792} \cdot B^{0,729}) / (H^{1,610} \cdot S^{0,026})\}$ (5)

Sendo: E_L é o coeficiente de dispersão (m^2/s); $u^* = (g \cdot I_0 \cdot H)^{0,5}$ a velocidade de atrito (m/s); g a aceleração da gravidade (m/s^2); I_0 a declividade de fundo do canal (m/m); H a profundidade média da seção (m); Q a vazão (m^3/s); S a declividade da linha de energia (m/m); B a largura da seção (m); U é a velocidade média da seção (m/s); e α_{ns} equivale a 1,1 na unidade do SI.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da metodologia descrita foram realizados os ensaios para determinação da rugosidade do canal no seu estado original e com as macro rugosidades. Na Tabela 2 mostram-se os valores calculados para a rugosidade do canal, na condição original, e com as simulações das diferentes rugosidades.

Tabela 2. Valores calculados da rugosidade do canal

Altura da macro rugosidade (m)	Rugosidade calculada (n)
-----	0,007
0,005	0,008
0,015	0,014

Observando a Tabela 2 nota-se que apesar de muito próximos, houve um aumento nos valores da rugosidade do canal com as interferências. Nota-se também que, com o aumento da altura das macro rugosidades o valor da rugosidade também teve um aumento, sendo este mais significativo para a altura de 0,015m.

Para avaliar a influência da rugosidade na pluma de dispersão do traçador, foi feito um gráfico da concentração (C) do traçador em três seções ao longo do canal (P_1 , P_2 e P_3). Em cada seção, foram determinadas as concentrações em três pontos (P_C , P_M , P_B), conforme mostra-se na Figura 2. Nota-se que a concentração diminui com a profundidade da seção, porém, se mantém aproximadamente o mesmo com o aumento da rugosidade.

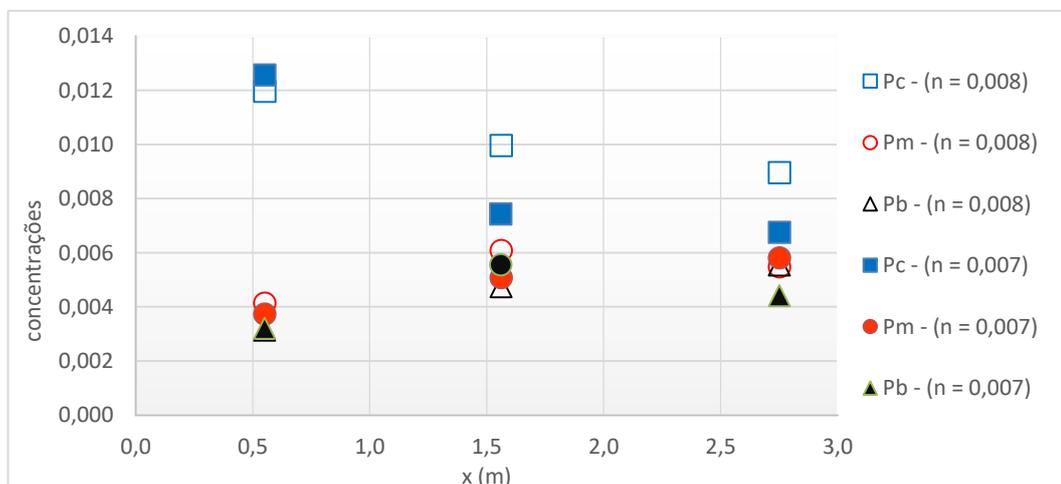


Figura 2 – Gráfico das concentrações do traçador ao longo do canal

A partir das leituras da lâmina d'água no canal, foi determinado o coeficiente de dispersão longitudinal (E_L) médio, com as Equações 2 a 5 mostradas na Tabela 1. Foram determinadas para o canal com a rugosidade original e com as macro rugosidades. Na Tabela 3 mostram-se os valores médios do coeficiente, calculado a partir de cada uma das equações.

Tabela 3. Coeficientes de dispersão longitudinal calculados

Autores	E_L (n = 0,007)	E_L (n = 0,008)	E_L (n = 0,014)
Seo e Chong (1998)	10,5181	9,7613	8,432094885
Nikora e Sukhodolov (1993)	0,1020	0,0964	0,08551
Kashesfipour e Falconer (2002)	990,1728	903,3043	763,0860
Devens (2006)	0,0027	0,0026	0,0022

Nota-se que há uma grande variação nos valores dos coeficientes determinados pelas diferentes equações empíricas, conforme já observado por Ribeiro (2010), Lopes (2016) e Devens (2010), visto que cada equação é definida a partir das condições de ensaio e parâmetros determinados por cada autor. Além disso, com o aumento da rugosidade ocorre uma diminuição no valor médio do coeficiente de dispersão longitudinal.

Para avaliar a influência do aumento da rugosidade no coeficiente de dispersão longitudinal (E_L), foram feitos gráficos de E_L ao longo do comprimento do canal, determinado a partir das Equações 2 a 5, mostradas na Tabela 1, para a rugosidade original do canal (n = 0,007), para o canal com 7 macro rugosidades de 0,005m de altura (n = 0,008) e com 7 macro rugosidades de 0,015m de altura (n = 0,014). Os gráficos mostram-se nas Figuras 3.a a 3.d.

Nota-se, a partir dos gráficos da Figura 3 que o coeficiente de dispersão aumenta ao longo do comprimento do canal, como é de se esperar, já que a concentração do traçador diminui ao longo do comprimento, comprovando que a dispersão é maior conforme o efluente se afasta do ponto de lançamento.

Observa-se também que com o aumento da rugosidade, ocorre uma diminuição no valor do coeficiente E_L . Vidal et. al (2015) já havia observado que o aumento na rugosidade provocava um aumento na velocidade de atrito do canal, diminuindo a velocidade de propagação da nuvem poluente.

O aumento na rugosidade média do canal faz com que aumente a velocidade de atrito, ou seja, há uma maior influência da camada limite laminar. Segundo Incropera e Dewit (2011), ocorre um retardamento do movimento das partículas na camada de fluido adjacente, que atuam no retardamento do movimento das partículas da próxima camada e assim sucessivamente aumentando a resistência ao escoamento, ou seja, a influência da camada limite laminar.

Considerando que uma parcela da dispersão é formada pela advecção, e esta depende dos gradientes de velocidade, e da turbulência, o aumento da influência da camada limite diminui este efeito, fazendo com que o coeficiente de dispersão longitudinal diminua com o aumento da rugosidade média do canal.

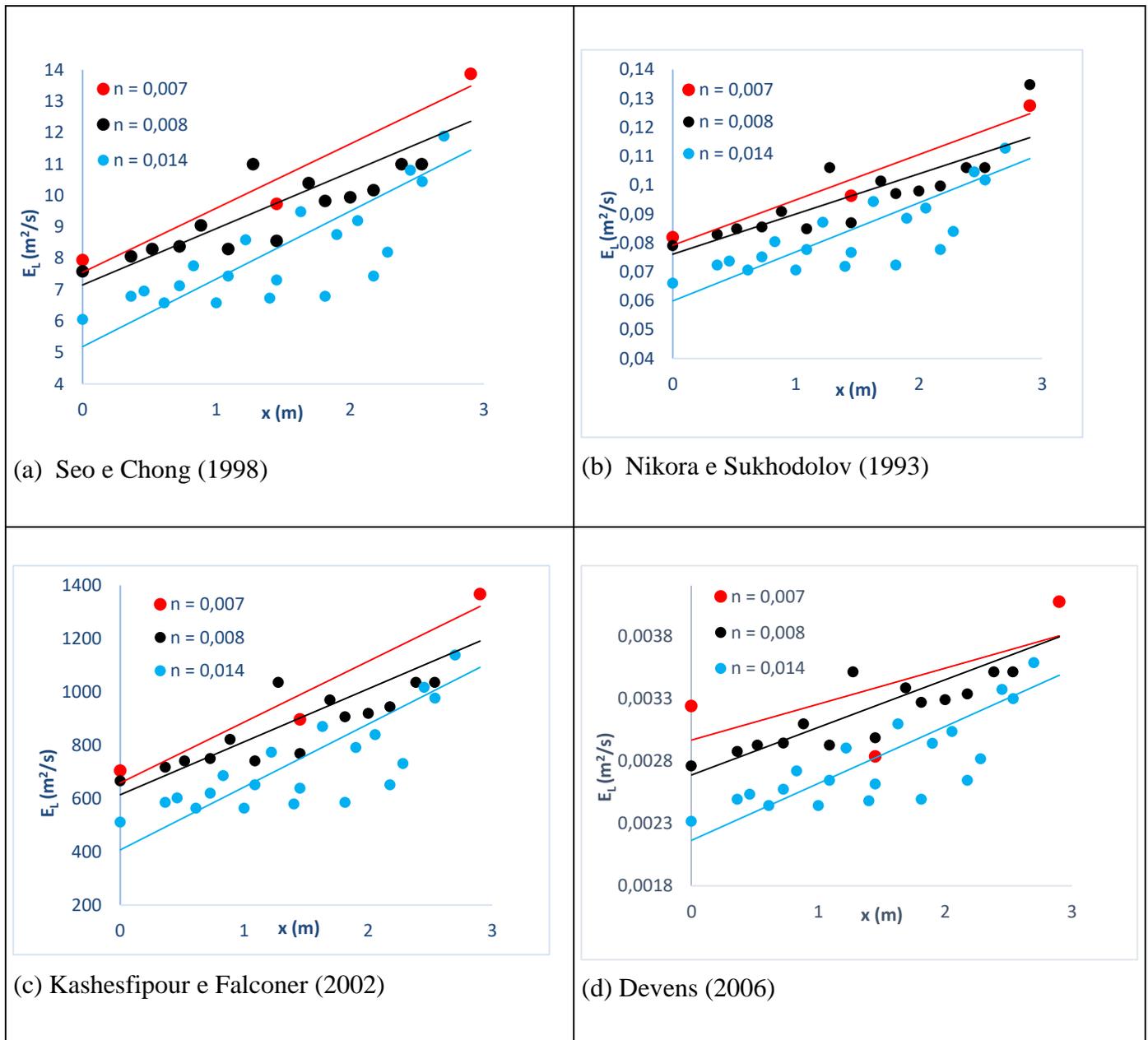


Figura 3 - Gráfico do coeficiente de dispersão longitudinal (E_L) ao longo do comprimento do canal

4. Conclusão

A água é um bem indispensável à vida, ao desenvolvimento econômico e ao bem estar das populações. O Brasil possui 13% da água disponível no planeta, e sua distribuição é desigual entre as regiões. Além disso, o país sofre com a falta de sistemas de coleta e tratamento dos efluentes: somente cerca de 50% da população é atendida por sistemas de tratamento de esgoto. Sendo assim, é necessário que se tenha o controle da poluição nos cursos d'água, já que muitas vezes os mesmos servem também para o abastecimento da população.

Para avaliar a dispersão de efluentes em um curso d'água é necessário que se conheça as suas características, tais como o coeficiente de dispersão longitudinal e como este varia de acordo com a

geométrica do canal e as características do escoamento. O coeficiente de dispersão longitudinal pode ser determinado através de modelos matemáticos, ou fórmulas empíricas.

Neste trabalho, o coeficiente de dispersão longitudinal foi determinado a partir de equações empíricas, variando a rugosidade do canal, para avaliar sua influência.

A partir dos resultados pode-se notar que o coeficiente de dispersão longitudinal aumenta ao longo do comprimento do canal, porém, o aumento da rugosidade provoca uma diminuição do coeficiente. Tal fato faz com que haja um aumento na influência da camada limite laminar, e da velocidade de atrito, diminuindo assim o coeficiente de dispersão longitudinal, visto que uma parcela da dispersão é influenciada pelo gradiente de velocidades.

É importante ressaltar que os resultados obtidos valem para as condições adotadas para a realização do estudo experimental deste trabalho.

Para trabalhos futuros sugere-se a realização dos ensaios em um canal com comprimento maior, e uma maior variação na rugosidade.

REFERÊNCIAS

AKIYAMA, K. R. (2016). *Estudo do coeficiente de dispersão em canal*. Limeira SP, 2016.

COSTA, D. (2011) *Estudo de Influências de Macro-Rugosidades do Leito de um Canal Hidráulico sobre o Coeficiente de Reoxigenação Superficial*, São Carlos SP.

DEVENS, J. (2006) *Quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal em pequenos cursos d'água naturais com o uso de traçador ambientalmente neutro*. Ouro Preto MG.

INCROPERA, F.P. e DEWITT, D.P. (2011). Introdução à convecção. In: *Fundamentos de transferência de Calor e Massa*. LTC: Livros Técnicos e Científicos, 5ª edição, pp 242 - 275.

KASHEFIPOUR, S.M. e FALCONER, R.A. (2002). Longitudinal dispersion coefficients in natural channels. *Water Research*, USA, 36. Pp. 1956 – 1608.

LOPES, M. S. (2016). *Montagem de um canal retangular hidráulico para o estudo experimental da dispersão de um traçador conservativo*. Limeira SP.

MACHADO, M. (2006) *Modelagem Tridimensional da Dispersão de Poluentes em Rios*. Campinas SP, 2006.

NIKORA, V.I e SUKHODOLOV, A.N. (1993). Longitudinal dispersion of a conservative pollutant in small rivers. *Proceedings of the First International Conference on Hydro-Science and Engineering*. Washington, DC, USA, pp. 379 – 384.

PORTO, R.de.M. (2006). *Hidráulica Básica*. São Carlos-SP: EESC-USP. 4ª edição, 2006.

RIBEIRO, C. B. de M. *et al* (2010). Desenvolvimento e validação de equação para determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em rios de médio porte. *Eng. Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro , v. 15, n. 4, p. 393-400, Dec.

SEO, W.; CHEONG, T.S. (1998) Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 124, n. 1, p. 25-32.

VIDAL, T.F.; CHAGAS, P.F.; SOUZA, R.O. (2015) Equação da dispersão de poluentes em rios, para diferentes fontes de lançamentos, considerando os diversos parâmetros hidráulicos do corpo hídrico. *Planejamento e Gestão dos recursos Hídricos. Fórum Ambiental da Alta Paulista*.