

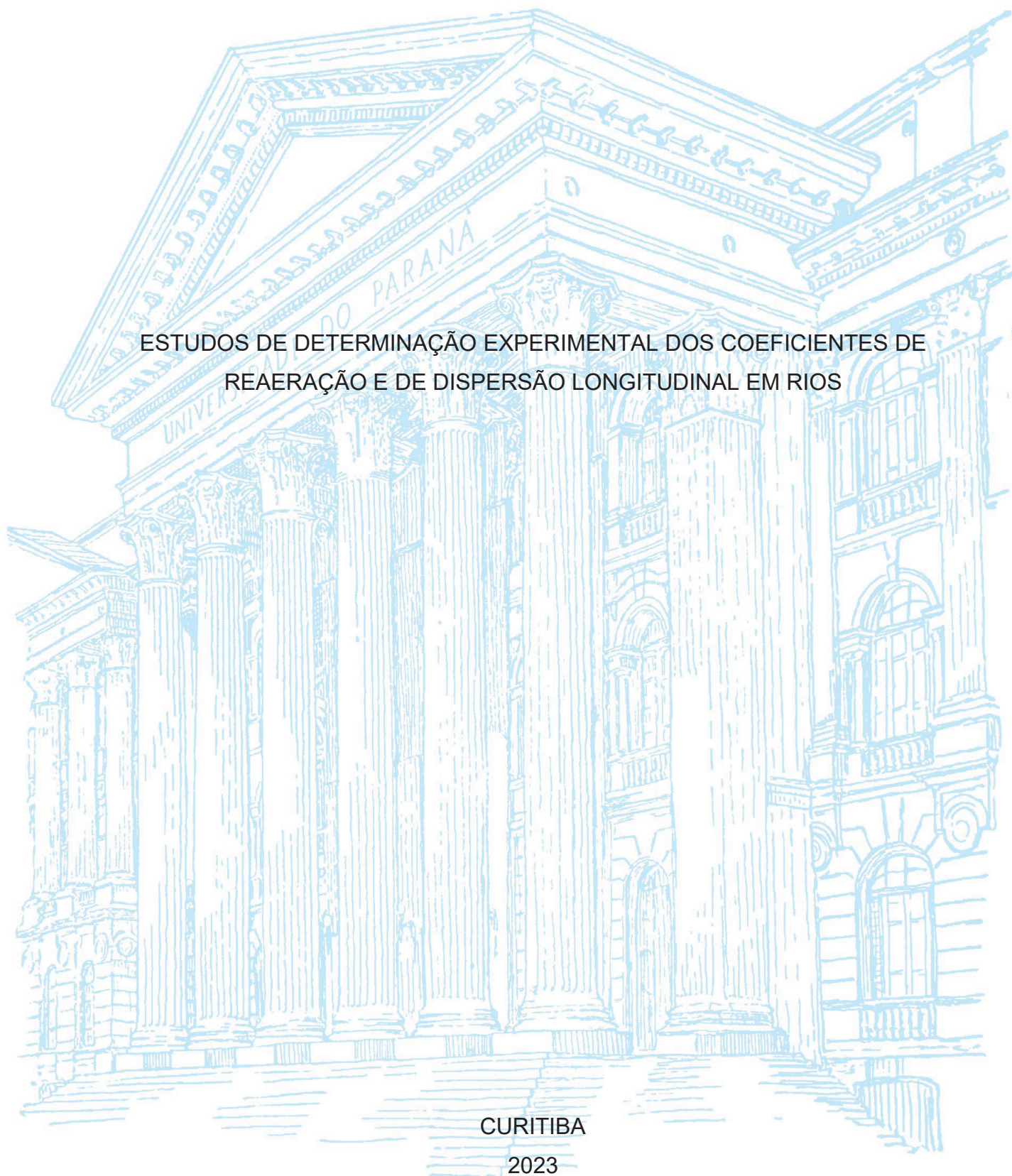
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIA FERNANDA DAMES DOS SANTOS LIMA

ESTUDOS DE DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS COEFICIENTES DE  
REAERAÇÃO E DE DISPERSÃO LONGITUDINAL EM RIOS

CURITIBA

2023



MARIA FERNANDA DAMES DOS SANTOS LIMA

ESTUDOS DE DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS  
COEFICIENTES DE REAERAÇÃO E DE DISPERSÃO  
LONGITUDINAL EM RIOS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Michael Mannich

Curitiba  
2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Lima, Maria Fernanda Dames dos Santos

Estudos de determinação experimental dos coeficientes de reaeração e de dispersão longitudinal em rios / Maria Fernanda Dames dos Santos Lima. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Orientador: Michael Mannich

1. Rios. 2. Controle de qualidade da água. 3. Rios - Dispersão longitudinal. 4. Rios - Coeficiente de reaeração. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Mannich, Michael. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **MARIA FERNANDA DAMES DOS SANTOS LIMA** intitulada: **Estudos de determinação experimental dos coeficientes de reaeração e de dispersão longitudinal em rios**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 04 de Setembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

04/09/2023 15:16:54.0

MICHAEL MANNICH

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

04/09/2023 15:11:38.0

CYNARA DE LOURDES DA NÓBREGA CUNHA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/09/2023 15:21:20.0

FERNANDO MAINARDI FAN

Avaliador Externo (UNIVER. FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica

04/09/2023 16:38:06.0

ADILSON PINHEIRO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

# Agradecimentos

Ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, tive massivo apoio e incentivo. Sem ambos, tudo teria sido muito mais difícil.

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me dar forças para superar os obstáculos encontrados ao longo do curso.

À minha família, especialmente aos meus pais, Andréa e Marcelo, por todo o amor, incentivo nas horas difíceis e suporte para concluir a minha formação. Por tudo isso, meu eterno agradecimento.

Aos professores, por todo o conhecimento compartilhado, em especial ao meu orientador, Michael Mannich, pela oportunidade de desenvolver este trabalho e, principalmente, por acreditar no meu potencial e me aconselhar em todos os momentos.

Aos meus colegas que se tornaram amigos, Luana e Andrei, que me auxiliaram nos experimentos e durante as disciplinas, tornando os momentos difíceis e cansativos em momentos divertidos.

Aos meus amigos e ao meu namorado, que participaram da minha formação de forma direta e indireta. Obrigada também por entenderem os momentos de minha ausência dedicados ao estudo e por nunca deixarem de estar ao meu lado.

Ao projeto MuDak por fornecer os dados necessários para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, na minha caminhada durante a pós graduação. Todos tiveram importância para que eu chegasse até aqui e esse trabalho fosse desenvolvido.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos  
não é senão uma gota de água no mar.  
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”  
(Madre Teresa de Calcutá)*

# RESUMO

O estudo da dispersão e do transporte de substâncias em rios são importantes para o gerenciamento da qualidade da água. Os modelos de qualidade da água ao representar ou calcular as distribuições de concentração, utilizam as equações de transporte de massa que são funções de variáveis como velocidade média, características geométricas do corpo d'água e coeficientes representando processos, como a dispersão da pluma com o coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ) e os processos de trocas gasosas com o coeficiente de reaeração ( $K_a$ ), que envolvem as reações de consumo de oxigênio entre a substância lançada e o meio aquático. Ambos os coeficientes descritos podem ser obtidos por meio de métodos experimentais, equações que consideram as características hidráulicas do local de estudo ou tratados como parâmetros de calibração em modelos. A determinação de  $D_L$  envolve experimentos com traçadores, que geram perfis de concentração ao longo do tempo sendo aplicados o método dos momentos, método da propagação, método de Chatwin, método da coroa de concentração e método do pico da concentração para sua determinação. Para a determinação experimental de  $K_a$ , o mais utilizado é o com traçadores gasosos, porém é um método com logística e custos elevados. Uma alternativa é o método delta, desenvolvido por McBride e Chapra (2005), que utiliza o perfil da variação de oxigênio dissolvido ao longo do dia para a estimativa de  $K_a$ . Este trabalho tem o objetivo de analisar e estimar experimentalmente os coeficientes de dispersão longitudinal e o de reaeração, comparando diferentes métodos indiretos e diretos. Os locais de estudo foram rios localizados em Curitiba-PR e na Região Metropolitana, com ensaios com o traçador Rodamina B no rio Barigui para a estimativa de  $D_L$ , e utilizando medições contínuas de oxigênio dissolvido e temperatura da água do rio Passaúna, para a estimativa de  $K_a$  por meio do método delta. Após a análise preliminar, foram aplicadas correções aos dados considerando as premissas dos métodos utilizados, para que diminuísse a incerteza dos resultados, como considerar a perda do traçador ao longo do rio para a determinação de  $D_L$  e desconsiderar os dias em que o perfil de oxigênio não se adaptava com as premissas e hipóteses do modelo. O  $D_L$  médio para o Rio Barigui foi de 5,46 m<sup>2</sup>/s com desvio padrão de 1,80 m<sup>2</sup>/s, e para o Rio Passaúna o  $K_a$  médio foi de 10,42 d<sup>-1</sup> com desvio padrão elevado de 13,56 d<sup>-1</sup>.

**Palavras-chaves:** Dispersão longitudinal em rios, coeficiente de reaeração, métodos experimentais.

# ABSTRACT

The study of the dispersion and transport of substances in rivers are important for the management of water quality. Water quality models, when representing or calculating concentration distributions, use mass transport equations contemplating variables such as average velocity, geometric characteristics of the water body and coefficients representing processes, such as plume dispersion with the dispersion coefficient longitudinal ( $D_L$ ) and gas exchange processes with the reaeration coefficient ( $K_a$ ), which involve chemical reactions between the released substance and the aquatic environment. Both coefficients described can be obtained through experimental methods, equations that consider the hydraulic characteristics of the study site or treated as calibration parameters in models. The determination of  $D_L$  involves experiments with tracers, which generate concentration profiles over time by applying the method of the moments, routing procedure, a graphic procedure due to Chatwin and a method based on the properties of the fundamental solution of the differential equation of the advection-dispersion for its determination. For the experimental determination of  $K_a$ , the most used method is with gaseous tracers, but it is a method with high logistics and costs. An alternative is the delta method, developed by McBride e Chapra (2005), which uses the profile of dissolved oxygen variation throughout the day to estimate  $K_a$ . This work aims to experimentally analyze and estimate the longitudinal dispersion and reaeration coefficients, comparing different indirect and direct methods. The study sites were rivers located in Curitiba-PR and Metropolitan Region, with tests with the tracer Rodamina B in the Barigui river for the estimate of  $D_L$ , and using continuous measurements of dissolved oxygen and water temperature of the Passaúna river, for the estimate of  $K_a$  using the delta method. After the preliminary analysis, corrections were applied to the data considering the assumptions of the methods used, in order to reduce the uncertainty of the results, such as considering the loss of the tracer along the river for the determination of  $D_L$  and disregarding the days when the profile of oxygen did not fit with the assumptions and hypotheses of the model. The average  $D_L$  for the Barigui River was 5.46 m<sup>2</sup>/s with a standard deviation of 1.80 m<sup>2</sup>/s, and for the Passaúna River the average  $K_a$  was 10.42 d<sup>-1</sup> with a standard deviation of 13.56 d<sup>-1</sup>.

**Key-words:** Longitudinal dispersion in rivers, reaeration coefficient, experimental methods.

# Lista de ilustrações

|                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Distribuição normal da equação 2.5. Fonte: Fischer et al. (1979). . . . .                                                                                                                                              | 21 |
| Figura 2 – Ilustração do processo de dispersão ao longo da distância $x$ , num período inicial $t_i$ e no período de Taylor. Fonte: Park et al. (2020). . . . .                                                                   | 22 |
| Figura 3 – (a) Um exemplo de distribuição de velocidade. (b) A mesma distribuição de velocidade que em (a), mas transformada em um sistema de coordenadas que se move na velocidade média. Fonte: Fischer et al. (1979) . . . . . | 23 |
| Figura 4 – Esquema do experimento com uso de traçadores, com duas seções de amostragem $x_1$ e $x_2$ . . . . .                                                                                                                    | 27 |
| Figura 5 – Comparação do perfil de concentração ao longo do tempo (a), com a reta produzida utilizando a equação 2.43 (b). Adaptado de Chatwin (1971). . . . .                                                                    | 31 |
| Figura 6 – Perfil de concentração ao longo da distância $x$ , num instante $t_i$ . Fonte: Barbosa Júnior et al. (2005a). . . . .                                                                                                  | 32 |
| Figura 7 – Progressão temporal da concentração e do déficit de oxigênio dissolvido, considerando a concentração de saturação constante ao longo do tempo. Fonte: Sperling (1996). . . . .                                         | 38 |
| Figura 8 – Balanço da concentração do OD em um rio, com destaque para o perfil do oxigênio dissolvido. Fonte: Sperling (1996). . . . .                                                                                            | 39 |
| Figura 9 – Processos de produção, transferência e consumo de oxigênio dissolvido na água. Fonte: Graepin (2016). . . . .                                                                                                          | 40 |
| Figura 10 – Concentração de saturação do oxigênio dissolvido na água em relação a variação da temperatura da água para diferentes altitudes conforme as equações 2.55 e 2.56. Adaptado de Chapra (2008). . . . .                  | 41 |
| Figura 11 – (a) Produção e respiração ao longo do dia, (b) déficit de oxigênio dissolvido ao longo do dia e (c) consumo de oxigênio dissolvido ao longo do dia. Fonte: McBride e Chapra (2005). . . . .                           | 45 |
| Figura 12 – Comparação do método delta e o método delta aproximado. Fonte: McBride e Chapra (2005). . . . .                                                                                                                       | 47 |
| Figura 13 – Localização do parque Tingui, com a seção de lançamento do traçador (P0) e as seções de amostragem (P1, P2, P3 e P4) ao longo do rio Barigui (Curitiba/PR). . . . .                                                   | 50 |
| Figura 14 – Ilustração da faixa de detecção do fluorímetro e a faixa desejável de medição estabelecida. . . . .                                                                                                                   | 51 |

|                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 15 – (a) Corante Rodamina B e (b) fluorímetro AquaFluor® da Turner Designs utilizado nos experimentos, e a (c) curva de concentração do traçador Rodamina B utilizada para calibrar o fluorímetro. . . . .                           | 52 |
| Figura 16 – Imagens do lançamento do traçador no rio Barigui (a), início da mistura (b) e no ponto P2 antes (c) e durante (d) a passagem da pluma do traçador, no dia 02/09/2022. . . . .                                                   | 52 |
| Figura 17 – Curvas de passagem do traçador Rodamina B ao longo do tempo para cada dia de experimento detalhado na Tabela 4. . . . .                                                                                                         | 55 |
| Figura 18 – Comparação dos valores de $D_L$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) utilizando diferentes métodos experimentais. . . . .                                                                                                                  | 58 |
| Figura 19 – Curva de concentração de Rodamina B excluindo o branco medido em campo na segunda seção de amostragem e a curva de concentração estimado utilizando o método da propagação, para cada ensaio realizado. . . . .                 | 60 |
| Figura 20 – Relação entre $D_L$ (em escala log) com relação às variáveis normalizadas $\Delta t/t_c$ e $C_C/C_P$ , com o resultado obtido utilizando o método da coroa de concentração para cada seção de amostragem e experimento. . . . . | 61 |
| Figura 21 – Reta ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 30/08/2022, E1 e E1.1. . . . .                                                                                                                             | 62 |
| Figura 22 – Reta ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 02/09/2022, E2. . . . .                                                                                                                                    | 63 |
| Figura 23 – Reta ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 23/11/2022, E3. . . . .                                                                                                                                    | 63 |
| Figura 24 – Reta ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 09/02/2023, E4. . . . .                                                                                                                                    | 63 |
| Figura 25 – Reta ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 03/05/2022, E5 e E6. . . . .                                                                                                                               | 64 |
| Figura 26 – Reta ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 23/05/2022, E7. . . . .                                                                                                                                    | 64 |
| Figura 27 – Comparação dos resultados obtidos de $D_L$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) utilizando os métodos indiretos e os diretos. . . . .                                                                                                      | 66 |
| Figura 28 – Mapa com a representação das áreas da bacia até as seções P0, P2 e P4. . . . .                                                                                                                                                  | 67 |
| Figura 29 – Gráfico com a comparação dos resultados obtidos utilizando o método da propagação e do pico da concentração, com e sem correção dos dados. . . . .                                                                              | 70 |
| Figura 30 – Localização do reservatório de Passaúna com a hidrografia e a estação BR 277 – Campo Largo. . . . .                                                                                                                             | 72 |
| Figura 31 – Curva-chave do Rio Passaúna na seção BR 277. Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA) (2021). . . . .                                                                                                                             | 73 |
| Figura 32 – Hidrograma da vazão média diária ao longo do período 01/03/2018 a 30/04/2020 na seção da Estação BR 277 – Campo Largo. . . . .                                                                                                  | 74 |

|                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 33 – Seção transversal rio Passaúna, para o dia 21/03/2018 com cota de 1,07 metros. Fonte: Colombo (2019).                                                                                                                    | 75  |
| Figura 34 – Série de dados de temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ), concentração de OD ( $\text{mg/L}$ ) e porcentagem da $C_{OD}$ em relação a $C_{ODsat}$ (%).                                                               | 76  |
| Figura 35 – Perfis diários de OD que desenvolveram característica senoidal conforme preconizado pelo modelo do método delta aproximado (MCBRIDE; CHAPRA, 2005), resultando em $K_{a,20}$ dentro da faixa de 5 a $20\text{ d}^{-1}$ . | 77  |
| Figura 36 – Valores de $K_{a,20}$ ( $\text{d}^{-1}$ ) utilizando as equações parametrizadas e pelo método delta aproximado ao longo do tempo.                                                                                        | 78  |
| Figura 37 – Boxplot com os valores de $K_{a,20}$ utilizando as equações parametrizadas e pelo método delta aproximado, com os blocos representando a variação dos dados, com a média e os valores extremos.                          | 79  |
| Figura 38 – Valores de $K_{a,20}$ pelo método delta aproximado com os respectivos valores de vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), profundidade média ( $\text{m}$ ) e velocidade ( $\text{m/s}$ ) para a seção de estudo.                | 81  |
| Figura 39 – Comparação dos valores calculados de $K_a$ utilizando o Método Delta e os obtidos pela equação de regressão múltipla, para o período de março de 2018 a novembro de 2020.                                                | 81  |
| Figura 40 – Ilustração da concentração do traçador ao longo do tempo, para os pontos $x_1$ e $x_2$ , dentro da faixa de detecção (0 – 400ppb) do fluorímetro AquaFluor® da Turner Designs.                                           | 94  |
| Figura 41 – Planilha com o calculo da estimativa da massa do traçador lançada no rio para os trechos P2 e P4.                                                                                                                        | 96  |
| Figura 42 – Curva de concentração medido em campo na segunda seção de amostragem e o perfil de concentração estimado utilizando o método da propagação, para os ensaios E3, E4, E5, E6 e E7.                                         | 97  |
| Figura 43 – Relação entre $D_L$ com $\Delta t$ e $C_C/C_P$ , com o resultado obtido utilizando o método da coroa de concentração para cada seção de amostragem e os ensaios E3, E4, E5, E6 e E7.                                     | 98  |
| Figura 44 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 23/11/2022.                                                                                                                                                                      | 98  |
| Figura 45 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 09/02/2023.                                                                                                                                                                      | 99  |
| Figura 46 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 03/05/2022.                                                                                                                                                                      | 99  |
| Figura 47 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 23/05/2022.                                                                                                                                                                      | 100 |
| Figura 48 – Curva de concentração medido em campo na segunda seção de amostragem e o perfil de concentração estimado utilizando o método da propagação, para os ensaios E3, E4, E5, E6 e E7.                                         | 101 |
| Figura 49 – Relação entre $D_L$ com $\Delta t$ e $C_C/C_P$ , com o resultado obtido utilizando o método da coroa de concentração para cada seção de amostragem e os ensaios E3, E4, E5, E6 e E7.                                     | 102 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 50 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 23/11/2022. . . . . | 102 |
| Figura 51 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 09/02/2023. . . . . | 103 |
| Figura 52 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 03/05/2022. . . . . | 103 |
| Figura 53 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 23/05/2022. . . . . | 104 |

# Lista de tabelas

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Equações para estimativa do coeficiente de dispersão longitudinal. . .                                                                               | 34 |
| Tabela 2 – Valores para $K_a$ para 20°C . . . . .                                                                                                               | 43 |
| Tabela 3 – Equações para estimativa do coeficiente de reaeração. . . . .                                                                                        | 48 |
| Tabela 4 – Identificação do local de amostragem e massa do traçador lançada em<br>cada dia do experimento. . . . .                                              | 51 |
| Tabela 5 – Parâmetros obtidos pelo medidor de vazão ADV FlowTracker na seção<br>P2. . . . .                                                                     | 54 |
| Tabela 6 – Parâmetros obtidos pelos ensaios. . . . .                                                                                                            | 54 |
| Tabela 7 – $D_L$ (m <sup>2</sup> /s) calculado com cada método para cada dia de experimento. .                                                                  | 57 |
| Tabela 8 – Aplicação das equações de Fischer et al. (1979), Deng, Singh e Bengtsson<br>(2001) e Devens, Júnior e Silva (2010) para o calculo do $D_L$ . . . . . | 65 |
| Tabela 9 – Comparação dos resultados dos parâmetros obtidos em cada ensaios<br>com e sem correção dos dados. . . . .                                            | 68 |
| Tabela 10 – Comparação dos resultados obtidos para $D_L$ (m <sup>2</sup> /s) em cada ensaios<br>com e sem correção dos dados. . . . .                           | 69 |
| Tabela 11 – Raiz do erro quadrático médio (ppb) obtido no método da propagação,<br>para cada ensaio, com e sem a correção dos dados. . . . .                    | 70 |
| Tabela 12 – Estatística descritiva para $K_a$ para cada método. . . . .                                                                                         | 80 |

# Lista de símbolos

|                 |                                                                             |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $D_L$           | Coeficiente de dispersão longitudinal ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )         |
| $K_a$           | Coeficiente de reaeração ( $\text{d}^{-1}$ )                                |
| $OD$            | Oxigênio dissolvido                                                         |
| $q$             | Fluxo de transporte de massa [ $\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$ ]              |
| $D_M$           | Coeficiente de difusão molecular [ $\text{L}^2\text{T}^{-1}$ ]              |
| $C$             | Concentração [ $\text{ML}^{-3}$ ]                                           |
| $x, y, z$       | Coordenadas espaciais [L]                                                   |
| $u, v, w$       | Velocidades em cada direção x,y e z [ $\text{LT}^{-1}$ ]                    |
| $t$             | Tempo [T]                                                                   |
| $M$             | Massa [M]                                                                   |
| $\sigma$        | Variância                                                                   |
| $L_M$           | Comprimento da zona advectiva (m)                                           |
| $U$             | Velocidade média na direção x ( $\text{ms}^{-1}$ )                          |
| $B$             | Largura média da seção transversal (m)                                      |
| $\varepsilon_t$ | Coeficiente de difusão turbulenta transversal ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ) |
| $u_*$           | Velocidade de atrito ( $\text{ms}^{-1}$ )                                   |
| $M_R$           | Massa recuperada [M]                                                        |
| $R_M$           | Fator de recuperação da massa do traçador                                   |
| $\mathbf{M}_n$  | Momento de ordem n                                                          |
| $H$             | Profundidade média do rio (m)                                               |
| $Q$             | Vazão do rio ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )                                  |
| $K_d$           | Coeficiente de degradação de DBO ( $\text{d}^{-1}$ )                        |
| $K_r$           | Coeficiente de decaimento total da matéria orgânica ( $\text{d}^{-1}$ )     |
| $K_s$           | Coeficiente de sedimentação ( $\text{d}^{-1}$ )                             |

|             |                                                                                           |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L$         | Concentração da DBO (mg/L)                                                                |
| $C_{ODsat}$ | Concentração de saturação do oxigênio dissolvido ( $\text{mgL}^{-1}$ )                    |
| $C_{OD}$    | Concentração de oxigênio dissolvido ( $\text{mgL}^{-1}$ )                                 |
| $T_a$       | Temperatura da água (K)                                                                   |
| $D$         | Déficit de oxigênio                                                                       |
| $\theta$    | Coefficiente de correção de temperatura                                                   |
| $T$         | Temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ )                                                |
| $K_{a20}$   | Coefficiente de reaeração a $20^{\circ}\text{C}$ ( $\text{d}^{-1}$ )                      |
| $R$         | Taxa de respiração [ $\text{mg}(\text{O})\text{L}^{-1}\text{h}^{-1}$ ]                    |
| $P$         | Taxa de produção primária das plantas [ $\text{mg}(\text{O})\text{L}^{-1}\text{h}^{-1}$ ] |
| $f$         | Fotoperíodo (h)                                                                           |
| $t_{min}$   | Horário onde ocorre o mínimo do déficit da concentração do oxigênio (h)                   |
| $t_{max}$   | Horário onde ocorre a máxima concentração de oxigênio (h)                                 |
| $t_f$       | Meio dia solar (h)                                                                        |
| $\eta$      | Fator de correção do fotoperíodo.                                                         |
| $\phi$      | Diferença entre o tempo do déficit mínimo de OD e o meio dia solar (h)                    |
| $S$         | Declividade do rio (m/m)                                                                  |
| $t_{UTC}$   | Hora do dia aproximada no relógio solar (h)                                               |
| $t_d$       | Fator de correção da hora (24 horas)                                                      |
| $c$         | Fator de correção do angulo ( $2\pi$ )                                                    |
| $\lambda_e$ | Longitude ( $rad$ )                                                                       |
| $\Phi$      | Latitude ( $rad$ )                                                                        |
| $\Psi$      | Ângulo de elevação local do Sol acima do horizonte ( $rad$ )                              |
| $\delta_s$  | Ângulo de declinação solar ( $rad$ )                                                      |
| $d$         | Dia Juliano do evento                                                                     |

|          |                                                          |
|----------|----------------------------------------------------------|
| $d_r$    | Dia Juliano do solstício de inverno para o ano do evento |
| $d_y$    | Quantidade de dias do ano do evento                      |
| $\Phi_r$ | Latitude do Trópico de Capricórnio ( $rad$ )             |
| $m$      | Anomalia média ( $rad$ )                                 |

# Sumário

|            |                                                                                  |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                                | <b>17</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Objetivos</b>                                                                 | <b>19</b> |
| 1.1.1      | Objetivo Geral                                                                   | 19        |
| 1.1.2      | Objetivos Específicos                                                            | 19        |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                                     | <b>20</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Fluxo de massa em corpos d'água</b>                                           | <b>20</b> |
| 2.1.1      | Equação da dispersão unidimensional                                              | 22        |
| 2.1.2      | Coefficiente de Dispersão Longitudinal                                           | 26        |
| <b>2.2</b> | <b>Métodos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal</b>          | <b>27</b> |
| 2.2.1      | Experimento com uso de traçadores                                                | 27        |
| 2.2.2      | Método dos momentos                                                              | 28        |
| 2.2.3      | Método da propagação ( <i>routing procedure</i> )                                | 29        |
| 2.2.4      | Método do pico de concentração                                                   | 30        |
| 2.2.5      | Método gráfico de Chatwin                                                        | 30        |
| 2.2.6      | Método da coroa de concentração (MCC)                                            | 32        |
| 2.2.7      | Métodos indiretos                                                                | 33        |
| <b>2.3</b> | <b>Panorama da determinação do <math>D_L</math></b>                              | <b>35</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Transporte de massa com processo reativo</b>                                  | <b>37</b> |
| 2.4.1      | Balanço de massa do oxigênio dissolvido                                          | 37        |
| 2.4.2      | Processo de transferência de gases na interface ar-água                          | 40        |
| <b>2.5</b> | <b>Métodos de determinação do coeficiente de reaeração</b>                       | <b>42</b> |
| 2.5.1      | Método dos traçadores gasosos                                                    | 43        |
| 2.5.2      | Método da sonda solúvel                                                          | 44        |
| 2.5.3      | Método da pressão sonora                                                         | 44        |
| 2.5.4      | Método Delta                                                                     | 44        |
| 2.5.5      | Equações parametrizadas                                                          | 47        |
| <b>2.6</b> | <b>Panorama das aplicações dos métodos para determinação de <math>K_a</math></b> | <b>48</b> |
| <b>3</b>   | <b>DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO LONGITUDINAL EM RIOS</b>             | <b>50</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Material e Métodos</b>                                                        | <b>50</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Resultados e discussões</b>                                                   | <b>53</b> |
| 3.2.1      | Método da propagação                                                             | 59        |
| 3.2.2      | Método da coroa da concentração                                                  | 60        |
| 3.2.3      | Método de Chatwin                                                                | 62        |

|            |                                                                                                        |            |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.4      | Métodos indiretos . . . . .                                                                            | 65         |
| 3.2.5      | Correção dos dados . . . . .                                                                           | 66         |
| 3.2.5.1    | Correção pela área da bacia . . . . .                                                                  | 67         |
| 3.2.5.2    | Correção pela massa . . . . .                                                                          | 68         |
| 3.2.5.3    | Comparação entre os resultados . . . . .                                                               | 68         |
| <b>3.3</b> | <b>Conclusões . . . . .</b>                                                                            | <b>70</b>  |
| <b>4</b>   | <b>DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO EM RIOS<br/>PELO MÉTODO DELTA . . . . .</b>                | <b>72</b>  |
| <b>4.1</b> | <b>Material e Métodos . . . . .</b>                                                                    | <b>72</b>  |
| 4.1.1      | Determinação do fotoperíodo ( $f$ ) . . . . .                                                          | 75         |
| <b>4.2</b> | <b>Resultados e discussões . . . . .</b>                                                               | <b>77</b>  |
| 4.2.1      | Regressão múltipla . . . . .                                                                           | 80         |
| <b>4.3</b> | <b>Conclusões . . . . .</b>                                                                            | <b>82</b>  |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO . . . . .</b>                                                                             | <b>83</b>  |
|            | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>                                                                           | <b>85</b>  |
|            | <b>APÊNDICE A – ESTIMATIVA DA MASSA DO TRAÇADOR A<br/>SER LANÇADA . . . . .</b>                        | <b>93</b>  |
|            | <b>APÊNDICE B – GRÁFICOS APÓS A APLICAÇÃO DO FATOR<br/>DE CORREÇÃO PELA ÁREA DA BACIA . . . . .</b>    | <b>97</b>  |
|            | <b>APÊNDICE C – GRÁFICOS APÓS A APLICAÇÃO DO FATOR<br/>DE CORREÇÃO PELA MASSA RECUPERADA . . . . .</b> | <b>101</b> |

# 1 Introdução

Em corpos de águas superficiais são lançados efluentes provenientes de atividades humanas, tanto de origem doméstica como efluentes industriais ou agrícolas, além de derramamentos acidentais (JIRKA, 2004). O autor Jirka (2004) mostra que a qualidade das águas, com seus atributos de distribuição espacial e temporal, é resultado de vários processos físicos, químicos e biológicos.

Conforme apontando por Deng, Bengtsson e Singh (2006), a modelagem do transporte e dispersão de poluentes em corpos de água (naturais ou artificiais), ou de derramamentos acidentais de poluentes, é de considerável importância para a qualidade ambiental e segurança. Os modelos de qualidade da água, determinam as distribuições de concentração, utilizam as equações de transporte de massa que são funções de variáveis como velocidade média, características geométricas do corpo d'água e coeficientes, como o coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ), que está relacionado com a dispersão da pluma e o coeficiente de reaeração ( $K_a$ ), que está relacionado com as reações de consumo e produção de oxigênio (BARBOSA JÚNIOR et al., 2005a; CHAPRA, 2008). Lima (2009) destaca que as variáveis devem ser bem avaliadas de modo que os modelos matemáticos possam produzir resultados confiáveis.

Fischer et al. (1979) define a dispersão de partículas ou de uma nuvem de contaminantes como o efeito combinado de cisalhamento vertical e da difusão transversal. Quando considerado o lançamento ou despejo de uma substância, a pluma irá sofrer o efeito combinado da dispersão e da advecção, na qual a pluma é estendida por fluxos de cisalhamentos nas direções longitudinal e transversal e é misturada por conta da difusão turbulenta dos escoamentos, difusão molecular e advecção (Park et al., 2020). Fischer et al. (1979) destaca que existe uma dificuldade de se estimar  $D_L$  pela falta de informações sobre os perfis transversais de velocidade. Uma série de simplificações são assumidas para a elaboração de equações empíricas para calcular  $D_L$ , considerando em sua maioria valores médios das características hidráulicas do rio, podendo resultar em incertezas nos resultados.

Além de modelos matemáticos empíricos, também conhecidos como modelos indiretos, existem os modelos diretos que são baseados nas propriedades da solução fundamental da equação diferencial da advecção-dispersão, que utilizam curvas medidas de concentração em função do tempo para obter  $D_L$ , por meio de ensaios de lançamento de traçadores conservativos em corpos d'água, com medições em seções após o trecho de comprimento de mistura do local do lançamento. Conforme apontado por Barbosa Júnior et al. (2005a), Soares, Pinheiro e Zucco (2013), Devens, Júnior e Silva (2010), Frasson (2013), os principais métodos são o método dos momentos, método da propagação, método do pico da concentração, método gráfico de Chatwin e o método da coroa da concentração.

Além da análise do comportamento espacial da pluma, é importante observar as reações que ocorrem entre a substância e o meio aquático. O oxigênio dissolvido (OD) participa nestas reações e é utilizado como um parâmetro de qualidade de água, essencial para o ecossistema aquático. Encontra-se na forma dissolvida e ocorrem processos de consumo, produção e transferência. O consumo de OD no corpo d'água ocorre por meio das reações de oxidação da matéria orgânica, nitrificação e demanda bentônica, enquanto a produção está relacionada a fotossíntese. A transferência de OD consiste no processo do oxigênio da atmosfera ser introduzido para o corpo d'água, através da interface água-ar, cessando a transferência quando ocorrer o equilíbrio da concentração do gás. Esse processo é denominado reaeração.

Existem diferentes maneiras de estimar o  $K_a$  para aplicações práticas. É comum utilizar valores de referência obtidos em outros estudos, organizados de forma tabular, equações parametrizadas e métodos experimentais. Os métodos experimentais são recomendados quando é necessário analisar com maior precisão uma região específica. O mais amplamente conhecido é o método dos traçadores gasosos, porém, é um método mais caro e necessita de equipe técnica especializada. Além do método dos traçadores, existem os métodos da sonda solúvel flutuante (GIORGETTI; GIANSAANTI, 1983) e o da pressão sonora (MORSE et al., 2007), que são mais recentes e necessitam de estudos para estabelecer uma relação teórica confiável, mas apresentam um custo menor e são menos precisos (ÁVILA, 2014; BICUDO; JAMES, 1991; FORMENTINI, 2010; GRAEPIN, 2016).

McBride e Chapra (2005) desenvolveram o método delta aproximado que foi elaborado a partir de uma adaptação do método delta proposto por Chapra e Toro (1991), no qual consiste em obter o coeficiente de reaeração por meio do perfil diurno do oxigênio dissolvido, utilizando uma equação elaborada por meio da comparação e análise dos conceitos de reaeração e taxas de produção primária e de respiração. A solução da equação diferencial foi organizada, conforme Chapra e Toro (1991), utilizando a relação entre os parâmetros originais propostos como forma de simplificar a solução.

Conforme observado por Ávila (2014) e Graepin (2016), o método delta aproximado é uma técnica que requer monitoramento contínuo e de baixo custo, mas em regiões em que existem despejos de efluentes, com características diferentes da do rio e próximo de áreas urbanas, ocorre variação no perfil de OD, por conta do alto consumo de e menor variação de OD, sendo indicado para áreas em que há pouca influência humana ou que o perfil de OD seja similar ao proposto pelo modelo.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é estimar e analisar o coeficiente de dispersão longitudinal e o coeficiente de reaeração em rios com o uso de métodos experimentais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

1. Comparar o coeficiente de dispersão longitudinal em rios obtidos experimentalmente, por meio de ensaios de traçadores por diferentes métodos de cálculo (método dos momentos, método da propagação, método do pico da concentração, método da coroa e método gráfico de Chatwin);
2. Determinar o coeficiente de reaeração o rio Passaúna utilizando o Método Delta Aproximado desenvolvido por McBride e Chapra (2005);
3. Definir restrições da validade de aplicação do Método Delta Aproximado sobre os dados de oxigênio dissolvido;
4. Comparar resultados experimentais de coeficiente de reaeração e o coeficiente de dispersão longitudinal com equações parametrizadas da literatura.
5. Avaliar correções nos dados dos ensaios de traçadores decorrente da não conservação total de massa.
6. analisar criticamente os dados

## 2 Revisão Bibliográfica

Essa revisão aborda a Equação de transporte e dispersão unidimensional, conhecida também como Equação da advecção-dispersão, que é utilizada para quantificar o transporte e a dispersão de poluentes. Dando destaque para a fundamentação teórica dos coeficientes de dispersão longitudinal e o de reaeração, além de métodos para a determinação dos mesmos.

### 2.1 Fluxo de massa em corpos d'água

Segundo a lei de Fick, o fluxo de massa difusivo molecular de um soluto em uma direção é proporcional ao gradiente de concentração nesta direção (CHAPRA, 2008), conforme a equação

$$q_x = -D_M \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (2.1)$$

onde  $q_x$  é o fluxo ou taxa de transporte de massa difusivo molecular [ $\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$ ],  $C$  é a concentração [ $\text{ML}^{-3}$ ],  $D_M$  é o coeficiente de difusão molecular [ $\text{L}^{-2}\text{T}^{-1}$ ] e  $x$  a direção [ $\text{L}$ ]. Considerando o fluido em repouso, a transferência de massa de um soluto ocorre da região de maior concentração para a de menor concentração, por conta da difusão molecular, e a equação 2.1, pode ser escrita para as três dimensões  $(x,y,z)$ .

Para satisfazer a conservação da massa, a variação do fluxo de massa numa distância  $\Delta x$ , deve ser igual a variação da concentração  $C$ , no intervalo de tempo  $\Delta t$ ,

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial t} = 0, \quad (2.2)$$

sendo assim, substituindo  $q$  pela equação 2.1, encontra-se a equação da difusão molecular unidimensional

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_M \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (2.3)$$

que também pode ser escrita nas três direções  $(x,y,z)$ .

A solução da equação da difusão considera como condições iniciais e de contorno  $C(x, 0) = M\delta(x)$  e  $C(\pm\infty, t) = 0$ , onde a função delta de Dirac  $\delta(x)$  é nula no tempo inicial em todos os lugares, exceto em  $x=0$ , e

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1. \quad (2.4)$$

Com isso, a solução para a equação 2.3 é

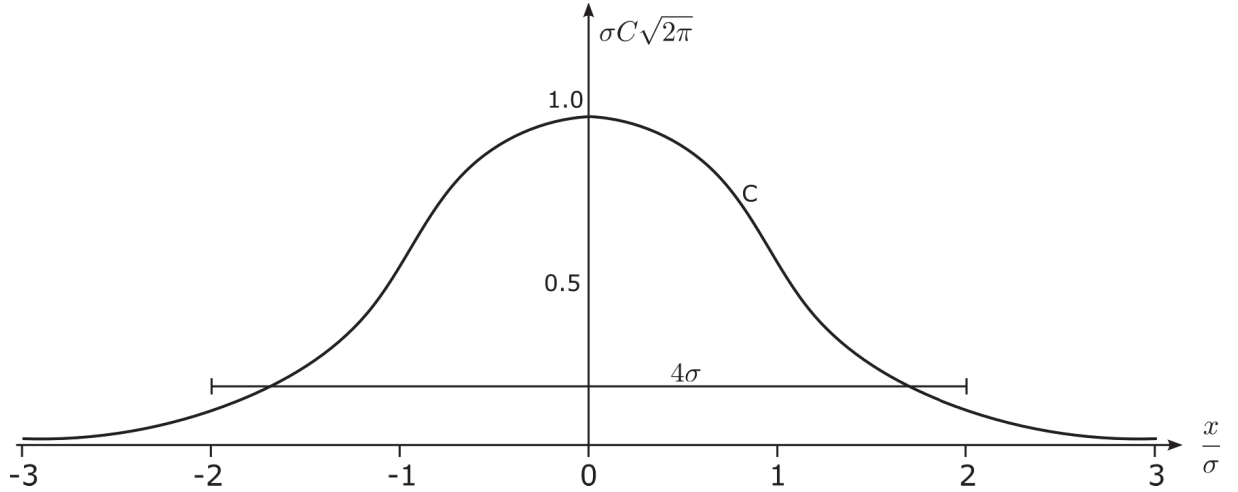


Figura 1 – Distribuição normal da equação 2.5. Fonte: Fischer et al. (1979).

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi D_M t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_M t}\right), \quad (2.5)$$

com  $M$  representando a massa. A solução é uma distribuição gaussiana, e se a massa for considerada igual a um, se transforma numa distribuição normal com variância equivalente a  $\sigma^2 = 2D_M t$  (Figura 1).

Agora, além da difusão molecular, é considerado o processo advectivo, ou seja, ocorrerá o transporte de massa com a mesma velocidade  $u$  que a do escoamento na direção  $x$ , sendo adicionado o termo  $uC$  no fluxo de massa difusivo

$$q = uC + \left(-D_M \frac{\partial C}{\partial x}\right), \quad (2.6)$$

e a equação 2.2 pode ser escrita como

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} = D_M \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (2.7)$$

O transporte de massa ocorre nas três dimensões, com as velocidades médias ( $u$ ,  $v$  e  $w$ ), resultando na equação de transporte de massa (FRENCH, 1985)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_M \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right). \quad (2.8)$$

Em casos de estudos em rios, é simplificado a equação de transporte de massa considerando mistura na seção transversal, sendo considerado apenas no sentido longitudinal, decorrente do sentido preferencial da velocidade  $u$ .

### 2.1.1 Equação da dispersão unidimensional

Os rios apresentam escoamentos turbulentos e seus efeitos precisam ser considerados para a estimativa da concentração ao longo do tempo. O fluido apresentar um movimento desordenado das partículas, a difusão turbulenta é um fenômeno importante para estimar o espalhamento e diluição de substâncias no corpo d'água. Nesta seção é apresentada a dedução da equação da dispersão unidimensional apresentada pelos autores Fischer et al. (1979) <sup>1</sup>.

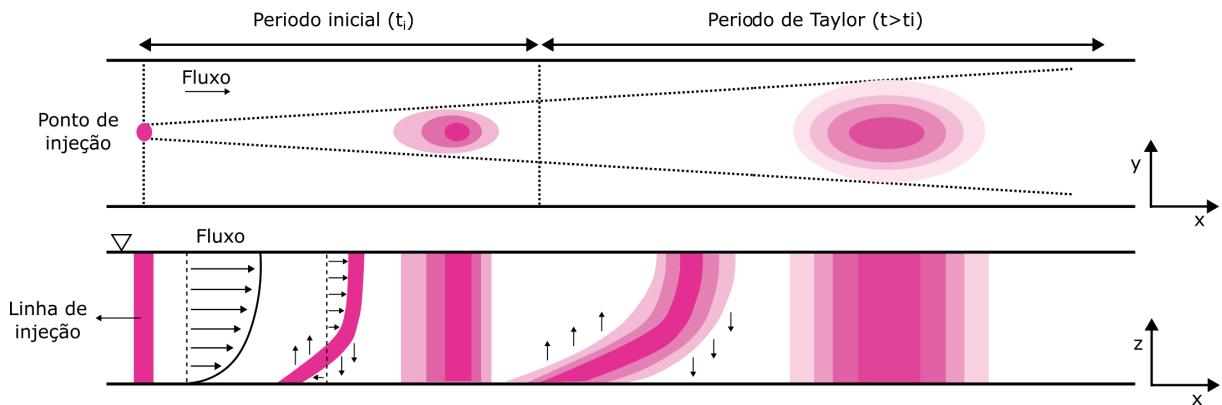


Figura 2 – Ilustração do processo de dispersão ao longo da distância  $x$ , num período inicial  $t_i$  e no período de Taylor. Fonte: Park et al. (2020).

Fischer et al. (1979) definem a dispersão de partículas ou de uma nuvem de contaminantes como o efeito combinado de cisalhamento vertical e da difusão transversal, como demonstrado na Figura 2, em que exemplifica a forma em que ocorre o efeito da difusão turbulenta e da advecção em uma linha de injeção vertical, na qual a pluma é esticada por fluxos de cisalhamentos nas direções longitudinal e transversal (PARK et al., 2020).

O período inicial representado na Figura 2 é o período em que a distribuição da concentração se assemelha com a forma do perfil de velocidade, em que ocorre o processo de difusão turbulenta, no qual a pluma ainda não se misturou completamente transversalmente. A distância deste trecho pode ser estimado pela equação (FISCHER et al., 1979) como

$$L_M = 0,10U \frac{B^2}{\varepsilon_t} \quad (2.9)$$

no qual  $L_M$  é o comprimento da zona advectiva (m),  $U$  é a velocidade média no trecho (m/s),  $B$  é a largura média (m) e  $\varepsilon_t$  é o coeficiente de difusão turbulenta transversal ( $m^2/s$ ), considerando com escoamento .

Após ocorrer a mistura completa na seção vertical, é denominado o período de Taylor, em que a seção transversal é essencialmente homogênea e apresenta forma gaussiana (JIRKA, 2004). A dedução a seguir será válida para este período de Taylor.

<sup>1</sup> Capítulo 4 - *Shear Flow Dispersion* do livro *Mixing in Inland and Coastal Waters*

Considerando inicialmente um escoamento laminar bidimensional, como esboçado na Figura 3a, que é guiado entre paredes paralelas separadas por uma distância  $h$  de modo que toda a linha de fluxo fique paralela as paredes. A variação da velocidade entre as paredes é definida como  $u(y)$ , e a média da velocidade é  $\bar{u}$ . A velocidade média, em uma seção vertical, pode ser encontrada pela integração de

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u dy, \quad (2.10)$$

e o desvio da velocidade da média  $u'(y)$  da seção transversal é definido como

$$u'(y) = u(y) - \bar{u}. \quad (2.11)$$

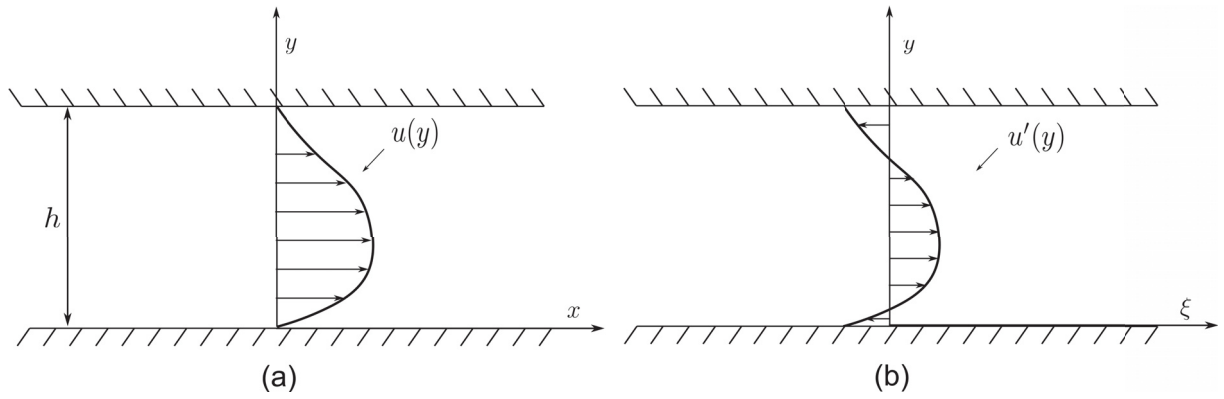


Figura 3 – (a) Um exemplo de distribuição de velocidade. (b) A mesma distribuição de velocidade que em (a), mas transformada em um sistema de coordenadas que se move na velocidade média. Fonte: Fischer et al. (1979)

A concentração do soluto  $C(x, y)$ , do fluxo exemplificado na Figura 3, com coeficiente de difusão molecular  $D_M$ , apresenta concentração média em qualquer seção transversal do fluxo como

$$\bar{C} = \frac{1}{h} \int_0^h C(y) dy. \quad (2.12)$$

De modo equivalente, o desvio de concentração da média é definido como  $C'(y) = C(y) - \bar{C}$ . Como hipótese do lançamento em linha, o fluxo ocorre na direção  $x$  e a equação de difusão (Equação 2.8) pode ser reescrita como

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{C} + C') + (\bar{u} + u') \frac{\partial}{\partial x}(\bar{C} + C') = D_M \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\bar{C} + C') + \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2} \right]. \quad (2.13)$$

A Equação 2.13 pode ser simplificada com uma transformação no sistema de coordenadas cuja origem se move na velocidade média do fluxo,

$$\xi = x - \bar{u}t, \tau = t \quad (2.14)$$

e observa-se que pela "regra da cadeia" do cálculo que

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \tau}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \tau}{\partial t} \frac{\partial}{\partial \tau} = -\bar{u} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \tau} \quad (2.16)$$

então a Equação 2.13 pode ser reescrita como

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\bar{C} + C') + u' \frac{\partial}{\partial \xi}(\bar{C} + C') = D_M \left[ \frac{\partial^2}{\partial \xi^2}(\bar{C} + C') + \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2} \right]. \quad (2.17)$$

A transformação para o sistema  $\xi, \tau$  permite encarar o fluxo como um observador se movendo na velocidade média do escoamento. No sistema móvel, a única velocidade observável é  $u'$ , conforme o esboço da Figura 3b, portanto, a equação transformada não contém  $\bar{u}$ .

Segundo Fischer et al. (1979) a taxa de propagação ao longo da direção do escoamento devido ao perfil de velocidade excede em muito aquela devido à difusão molecular. Nesse caso, pode-se negligenciar o termo de difusão longitudinal na Equação 2.17, resultando em

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \frac{\partial C'}{\partial \tau} + u' \frac{\partial C'}{\partial \xi} + u' \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi} = D_M \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2}. \quad (2.18)$$

Como  $u'$  varia com  $y$ , a equação não é resolvível, um procedimento geral para lidar com equações diferenciais, com coeficientes variáveis não está disponível, e nenhuma solução geral pode ser encontrada. Segundo Fischer et al. (1979), Taylor obteve sua solução descartando os três dos primeiros quatro termos, comparando as ordens de grandeza, incluindo o termo  $\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau}$ , a taxa da concentração para deixar uma equação facilmente resolvível para  $C'(y)$

$$u' \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi} = D_M \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2}, \quad (2.19)$$

com  $\frac{\partial C'}{\partial y} = 0$  em  $y = 0, h$ . A justificativa para  $\frac{\partial C'}{\partial y} = 0$  depende das ordens de magnitude dos termos da equação, aplicando o operador  $1/h \int_0^h() dy$  a cada termo de Equação 2.18, tem-se

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \overline{u' \frac{\partial C'}{\partial \xi}} = 0, \quad (2.20)$$

Subtraindo Equação 2.20 de Equação 2.18 dá

$$\underbrace{\frac{\partial C'}{\partial \tau}}_{\text{i}} + \underbrace{u' \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi}}_{\text{ii}} + \underbrace{u' \frac{\partial C'}{\partial \xi}}_{\text{iii}} - \underbrace{\overline{u' \frac{\partial C'}{\partial \xi}}}_{\text{iv}} = \underbrace{D_M \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2}}_{\text{v}}. \quad (2.21)$$

Considerando que  $\bar{C}$  e  $C'$  serão funções que variam lentamente e  $C'$  será muito menor do que  $\bar{C}$ , o terceiro e o quarto termos da equação 2.21 irão quase se anular e serão muito

menores que o segundo termo. Sendo assim é possível simplificar a equação, eliminando os termos três e quatro, deixando a equação de difusão para uma seção transversal

$$\frac{\partial C'}{\partial \tau} - D_M \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2} = -u' \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi}, \quad (2.22)$$

em que o termo  $-u' \frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi}$  desempenha o papel de uma fonte de intensidade variável. A adição líquida pelo termo de origem é zero porque a média de  $u'$  é zero. Se, além disso,  $\frac{\partial \bar{C}}{\partial \xi}$  permanece constante por um longo tempo, de modo que a fonte é constante, a solução para a equação 2.22 reduzida é a solução de estado estacionário obtida resolvendo equação 2.19, sendo justificado a simplificação dos primeiros três termos da equação 2.18, feita por Taylor citado por Fischer et al. (1979). A solução para Equação 2.19 implica que o perfil de concentração da seção transversal,  $C'(y)$  é estabelecido por um equilíbrio simples entre o transporte advectivo longitudinal e o transporte difusivo transversal.

A Equação 2.19 tem a solução

$$C'(y) = \frac{1}{D_M} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \int_0^y \int_0^y u' dy dy + C'(0). \quad (2.23)$$

A taxa do transporte de massa, em relação ao eixo de coordenadas moveis, é dado por

$$\dot{M} = \int_0^h u' C' dy = \frac{1}{D_M} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \int_0^h u' \int_0^y \int_0^y u' dy dy dy, \quad (2.24)$$

com termo extra  $\int_0^h u' C(0) dy = 0$  porque  $\int_0^h u' dy = 0$ .

O transporte de massa total na direção da corrente é proporcional aos gradientes de concentração na direção da corrente. Este é exatamente o resultado que encontramos para a difusão molecular, mas agora o encontramos em um sentido integrado para a difusão na direção do fluxo devido a todo o campo de fluxo. Pode-se definir um coeficiente de transporte de massa, ou coeficiente de dispersão, em analogia ao coeficiente de difusão, pela equação

$$\dot{M} = -h D_L \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}, \quad (2.25)$$

em que  $h$ , a profundidade, é a área por unidade de largura do escoamento. O coeficiente de dispersão  $D_L$  é geralmente conhecido como coeficiente de dispersão longitudinal.

Comparando as Equações 2.24 e 2.25, deu-se que

$$D_L = \frac{-1}{h D} \int_0^h u' \int_0^y \int_0^y u' dy dy dy. \quad (2.26)$$

$D_L$  desempenha o mesmo papel para toda a seção transversal assim como  $D_M$ , o coeficiente de difusão molecular, em uma escala microscópica. Sendo assim, pode-se escrever uma equação de difusão unidimensional para médias de seção transversal, que no sistema de coordenadas móvel é

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = D_L \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \xi^2}. \quad (2.27)$$

Para retornar ao sistema de coordenadas fixo, deve-se reintroduzir o termo contendo a velocidade advectiva média, resultando em

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2}. \quad (2.28)$$

Com  $D_L$  representando o coeficiente de dispersão longitudinal e para simplificar a notação, será substituído  $\bar{C}$  por  $C$  e  $\bar{u}$  por  $U$ , de modo que por fim a equação

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (2.29)$$

com a solução para fonte pontual sendo

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi D_L t}} \exp\left(-\frac{(x - Ut)^2}{4D_L t}\right). \quad (2.30)$$

A equação 2.29 é conhecida como a equação da dispersão unidimensional, que considera apenas a dimensão  $x$  e é amplamente utilizado na análise de dispersão em fluxos ambientais, majoritariamente unidimensionais como rios (FISCHER et al., 1979).

### 2.1.2 Coeficiente de Dispersão Longitudinal

Na seção 2.1 foi apresentada a fundamentação teórica da equação de advecção-dispersão unidimensional (Equação 2.29), com o coeficiente de dispersão longitudinal sendo representando por uma integral (Equação 2.26) em função do coeficiente de difusão molecular  $D$ , que foi desenvolvida considerando um fluxo laminar. Segundo Fischer et al. (1979), para o caso de um fluxo turbulento é necessário realizar algumas alterações, ao invés de considerar o coeficiente molecular, será considerado o coeficiente de difusão turbulenta ( $\varepsilon_t$ ), que é uma função da seção transversal ( $y$ ).

Sendo assim, a equação 2.26, se tornará

$$D_L = \frac{-1}{h} \int_0^h u' \int_0^y \frac{1}{\varepsilon_t} \int_0^y u' dy dy dy. \quad (2.31)$$

O  $\varepsilon_t$  pode ser aproximado como  $\varepsilon_t = 0,15hu^*$  (FISCHER et al., 1979), onde  $h$  é a profundidade média no trecho (m) e  $u_*$  a velocidade de atrito ( $\sqrt{\tau_0/\rho}$ ). A difusão turbulenta é aproximadamente análoga a difusão molecular, tendo como diferença a escala do espalhamento das partículas, que por conta da turbulência geram redemoinhos chegando a escala máxima da profundidade do rio, enquanto a difusão molecular é o espalhamento das partículas na escala microscópica.

## 2.2 Métodos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal

Para a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal é possível utilizar métodos indiretos e diretos. Os indiretos estão relacionados a modelos matemáticos, que tendem a relacionar o  $D_L$  com parâmetros físicos, como profundidade média, largura, declividade, velocidade média e vazão (SOARES; PINHEIRO; ZUCCO, 2013). Enquanto os métodos diretos utilizam dados obtidos por meio de experimentos com traçadores, sendo analisada a passagem da pluma do traçador e medindo concentração em função do tempo em diferentes seções de amostragem.

Segundo Barbosa Júnior et al. (2005a), Devens, Júnior e Silva (2006), Devens (2006), Oliveira (2013) e Soares, Pinheiro e Zucco (2013), os métodos diretos mais utilizados são o método dos momentos, método de propagação, método gráfico de Chatwin, método do pico de concentração e o método da coroa de concentração, que são detalhados nessa seção.

### 2.2.1 Experimento com uso de traçadores

Os métodos diretos são aplicados utilizando o resultado de experimentos com o uso de traçadores, que são substâncias utilizadas para controlar um fluxo. O experimento consiste no lançamento de um traçador, com coletas de amostras em seções após a zona de mistura, ou seja, mistura completa na seção transversal e vertical, ao longo do tempo durante a passagem da pluma do traçador lançado, tendo como resultado uma curva de concentração ao longo do tempo em cada local de amostragem. A quantidade de seções irá variar para cada método. Para alguns métodos apenas uma seção de amostragem é suficiente e em outros é necessário a coleta em duas seções. A figura 4 ilustra o local do lançamento do traçador e, à jusante, as seções de coletas de amostras.



Figura 4 – Esquema do experimento com uso de traçadores, com duas seções de amostragem  $x_1$  e  $x_2$ .

O traçador utilizado precisa apresentar o mesmo comportamento do escoamento em análise, não devem ocorrer naturalmente ou apenas em baixas concentrações no local de estudo e ser facilmente detectável (GOLDSCHIEDER et al., 2008). Conforme apontado por Behrens et al. (2001) e Goldscheider et al. (2008), não existe traçador ideal e perfeitamente

conservativo, os quais devem ser utilizados com cautela e minimizado a quantidade lançada. Os mais utilizados para o experimento de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal são os traçadores fluorescentes ou salinos, cada tipo pode apresentar problemas, como os fluorescentes serem genotóxicos e biodegradáveis, enquanto os salinos podem formar compostos tóxicos e serem bioquimicamente instáveis.

Os traçadores fluorescentes podem ser compostos orgânicos ou inorgânicos, sendo os corantes mais conhecidos a fluoresceína, isotiocianato de fluoresceína, rodamina-B, rodamina-WT, eosina, Evans Blue e urânio (SILVA et al., 2009). São substâncias de alta solubilidade em água e que permitem a utilização de pequenas quantidades, com grande sensibilidade em fluorímetros. Os autores Behrens et al. (2001) citam que os corantes fluorescentes devem ser utilizados com cautela para evitar prejuízos aos organismos aquáticos e a população, principalmente em locais em que são feitas captações de água potável.

Os traçadores salinos mais utilizados, listados por Duarte (1973) são cloreto de sódio (NaCl), brometo de potássio (KBr), brometo de amônio (NH<sub>4</sub>Br), iodeto de potássio (KI), cloreto de lítio (LiCl) e bórax (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> · 10H<sub>2</sub>O). O primeiro sendo o mais utilizado por ser o sal de cozinha, é um material barato e de fácil obtenção, sendo medido através de um medidor de condutividade elétrica. Conforme destacado por Moore et al. (2004) e Frasson (2013), é encontrado de forma natural nos corpos d'água, podendo limitar o seu uso como traçador e é necessário utilizar em grandes quantidades, limitando ao uso em trechos de curtas distâncias.

Os traçadores são utilizados com a premissa de serem conservativos, mas apresentam potencial de não conservar a massa (RUNKEL, 2015), a verificação da perda da massa do traçador lançada pode ser calculada como a

$$M_R(x_i) = Q \int_{t_{inicial}}^{t_{final}} C(x_i, t) dt \quad (2.32)$$

no qual  $M_R(x_i)$  é a massa recuperada na seção  $x_i$ ,  $Q$  a vazão do rio e  $\int_{t_{inicial}}^{t_{final}} C(x_i, t) dt$  é a integral da curva de concentração ao longo do tempo na seção  $x_i$ . O fator de recuperação da massa do traçador entre as seções  $x_1$  e  $x_2$  é dado por:

$$R_M = \frac{M_R(x_2)}{M_R(x_1)}. \quad (2.33)$$

## 2.2.2 Método dos momentos

O método dos momentos, desenvolvido por Thackston, Hays e Krenkel (1967, apud Fisher (1968)), considera a relação do  $D_L$  com a taxa da variação da variância da nuvem do traçador, utilizando o mesmo conceito que a lei de Fick que resulta na distribuição gaussiana (Eq. 2.5), descrevendo  $D_L$  como

$$D_L = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_x^2}{dt}, \quad (2.34)$$

no qual a variância espacial ( $\sigma_x^2$ ) da distribuição da concentração pode ser aproximada para a variância temporal ( $\sigma_t^2$ ) considerando que  $\sigma_x^2 = u^2 \sigma_t^2$ . Essa aproximação pode ser feita por conta da hipótese da "nuvem congelada" (do inglês "*frozen cloud*"), em que a pluma do traçador não altera seu formato durante a passagem no ponto de monitoramento (BARBOSA JÚNIOR et al., 2005a; DEVENS, 2006; OLIVEIRA, 2013), sendo necessárias duas curvas de concentração em relação ao tempo para duas posições diferentes para utilizar o método. Desta, pode-se reescrever entre dois pontos discretos a equação 2.34 como

$$D_L \approx \frac{U^2}{2} \frac{\sigma_t^2(x_2) - \sigma_t^2(x_1)}{\bar{t}(x_2) - \bar{t}(x_1)}, \quad (2.35)$$

com  $U$  representando a velocidade média no trecho  $x_1$ - $x_2$  e, para cada seção de amostragem,  $\bar{t}$  sendo o tempo médio da passagem da pluma no trecho  $x_1$ - $x_2$  e  $\sigma_t$  a variância, que podem ser estimados utilizando as equações

$$U = \frac{x_2 - x_1}{\bar{t}(x_2) - \bar{t}(x_1)}, \quad (2.36)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^\infty (t - \bar{t})^2 \cdot C(t) dt}{\int_0^\infty C(t) dt} = \frac{\mathbf{M}_2}{\mathbf{M}_0} - \left( \frac{\mathbf{M}_1}{\mathbf{M}_0} \right)^2, \quad (2.37)$$

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty t \cdot C(t) dt}{\int_0^\infty C(t) dt} = \frac{\mathbf{M}_1}{\mathbf{M}_0}. \quad (2.38)$$

Os tempos médios e as variâncias para cada seção de amostragem podem ser calculados utilizando os momentos das distribuições temporais de ordem zero, um e dois ( $\mathbf{M}_0$ ,  $\mathbf{M}_1$  e  $\mathbf{M}_2$ ) como representado pelas equações 2.37 e 2.38, com o momento de ordem  $n$  sendo definido como

$$\mathbf{M}_n = \int_0^\infty t^n \cdot C(t) dt. \quad (2.39)$$

De acordo com Fisher (1968) e Oliveira (2013), o método dos momentos pode resultar em imprecisões, por conta da curva de concentração apresentar longa cauda de baixa concentração, que influencia no resultado da variância.

### 2.2.3 Método da propagação (*routing procedure*)

O método da propagação, do inglês *routing procedure*, desenvolvido por Fisher (1968), utiliza dados experimentais com injeção instantânea do traçador (BARBOSA JÚNIOR et al., 2005a; DEVENS, 2006). O método da propagação precisa de dois perfis completos de concentração em função do tempo em pontos diferentes ( $x_1$  e  $x_2$ ), e consiste em utilizar

os valores do primeiro perfil para estimar a melhor aproximação de propagação para o segundo perfil, variando os parâmetros de velocidade e  $D_L$ . Determina-se o melhor conjunto de dados para  $U$  e  $D_L$ , em que minimiza o quadrado médio das diferenças dos valores medidos e estimados.

O método se baseia na equação da advecção-dispersão longitudinal (Equação 2.29) e considera a hipótese de nuvem congelada (RUTHERFORD, 1994), aplicando uma integral de convolução da distribuição inicial  $C(x_1, t)$  e gerando uma distribuição da concentração na seção a jusante  $C(x_2, t)$  (FRENCH, 1985) dado por

$$C(x_2, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C(x_1, \tau)}{\sqrt{4\pi D_L(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}} \exp \left\{ -\frac{[U(\bar{t}_2 - \bar{t}_1 - t + \tau)]^2}{4D_L(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)} \right\} U d\tau, \quad (2.40)$$

com  $\tau$  representando a variável temporal de integração.

Segundo Barbosa Júnior et al. (2005a), Devens (2006) e Soares, Pinheiro e Zucco (2013), o método da propagação é um dos métodos mais utilizados e bem aceitos para a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal, que considera as características do trecho em análise e, diferente do método dos momentos, não é afetado pela importância excessiva dada as caudas de distribuição. Porém, segundo Eiger (1991), pode resultar em incertezas por considerar a hipótese da nuvem congelada.

## 2.2.4 Método do pico de concentração

O método do pico de concentração, foi elaborado por Rutherford (1994), que considera a concentração máxima ( $C_p$ ) para determinar  $D_L$ , ou seja, quando  $x = Ut$ , com isso a equação 2.30 resulta em

$$C_p = \frac{M}{A\sqrt{4\pi D_L t_i}} = \frac{M}{A\sqrt{4\pi D_L \frac{x_p}{U}}}, \quad (2.41)$$

em que  $t_i$  é um tempo fixo e  $x_p$  é a posição após a fonte em que a concentração é máxima no tempo  $t_i$ . Para obter o  $D_L$  através do método do pico de concentração é preciso conhecer a massa injetada e a área da seção, além da velocidade do escoamento ( $U$ ).

## 2.2.5 Método gráfico de Chatwin

O método gráfico de Chatwin (CHATWIN, 1971) aplica transformações logarítmicas à equação 2.30, linearizando-a em termos de novas variáveis. Partindo da equação 2.30 e considerando  $k = M/A\sqrt{4\pi D_L}$  tem-se

$$C = \frac{k}{\sqrt{t}} \exp \left[ -\frac{(x - ut)^2}{4D_L t} \right]. \quad (2.42)$$

Operando a Equação 2.42 conforme os passos

$$\frac{k}{C\sqrt{t}} = \exp\left[\frac{(x - ut)^2}{4D_L t}\right]$$

$$\ln\left(\frac{k}{C\sqrt{t}}\right) = \frac{(x - ut)^2}{4D_L t}$$

$$t \cdot \ln\left(\frac{k}{C\sqrt{t}}\right) = \left(\frac{x - ut}{2\sqrt{D_L}}\right)^2$$

resulta por fim na equação

$$\left[t \cdot \ln\left(\frac{k}{C\sqrt{t}}\right)\right]^{1/2} = \frac{x}{2\sqrt{D_L}} - \frac{Ut}{2\sqrt{D_L}}, \quad (2.43)$$

no qual  $k$  representa o coeficiente proporcional à quantidade de material sendo transportando no escoamento.

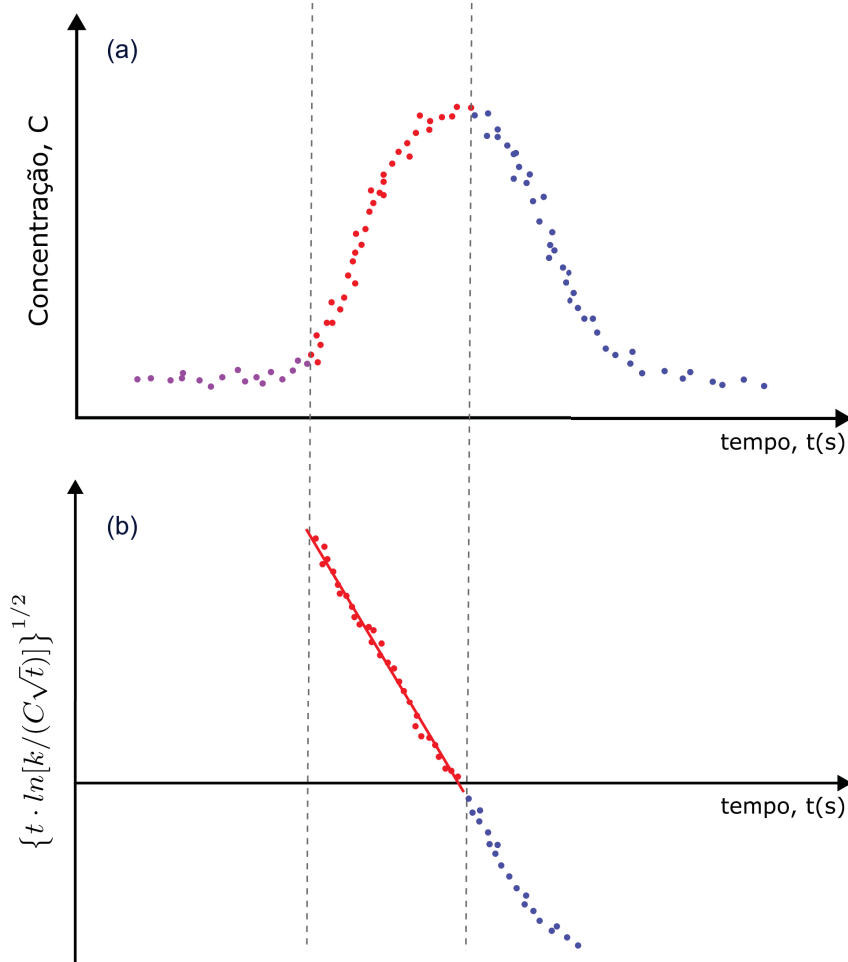


Figura 5 – Comparação do perfil de concentração ao longo do tempo (a), com a reta produzida utilizando a equação 2.43 (b). Adaptado de Chatwin (1971).

A partir de dados em campo é possível gerar o gráfico com os pares de valores  $\left(t \cdot \ln[k/(C\sqrt{t})]\right)^{1/2}$ ,  $t$ , como exemplificado na Figura 5, em que o perfil de concentração

ao longo do tempo pode ser transformado em uma reta, após o pico os resultados obtidos tendem a se afastar da reta produzida. Relacionando a equação 2.43 com o gráfico (Figura 5b), são obtidos os valores da velocidade e do coeficiente de dispersão longitudinal, por meio do coeficiente angular da reta  $a = -\frac{U}{2\sqrt{D_L}}$  e da interseção com o eixo das ordenadas  $b = \frac{x}{2\sqrt{D_L}}$ .

Conforme destacado por Devens (2006), o método pode apresentar menor custo quando comparado ao método dos momentos e o método da propagação, por precisar de apenas um ponto de amostragem, porém a equação 2.43 se baseia na distribuição gaussiana, o que não é observado experimentalmente, acrescentando incertezas na determinação de  $D_L$ .

### 2.2.6 Método da coroa de concentração (MCC)

O método da coroa de concentração (MCC) considera uma concentração de referência arbitrária ou crítica ( $C_c$ ) em um tempo fixo ( $t_i$ ) e relaciona com a concentração máxima ( $C_p$ ), obtendo a seguinte relação a partir das equações 2.30 e 2.41 como

$$\ln \frac{C_c}{C_p} = -\frac{(x_c - Ut_i)^2}{4D_L t_i}, \quad (2.44)$$

podendo ainda ser reescrita como

$$(x_c - Ut_i)^2 = 4D_L \cdot t_i \cdot \ln \frac{C_p}{C_c}. \quad (2.45)$$

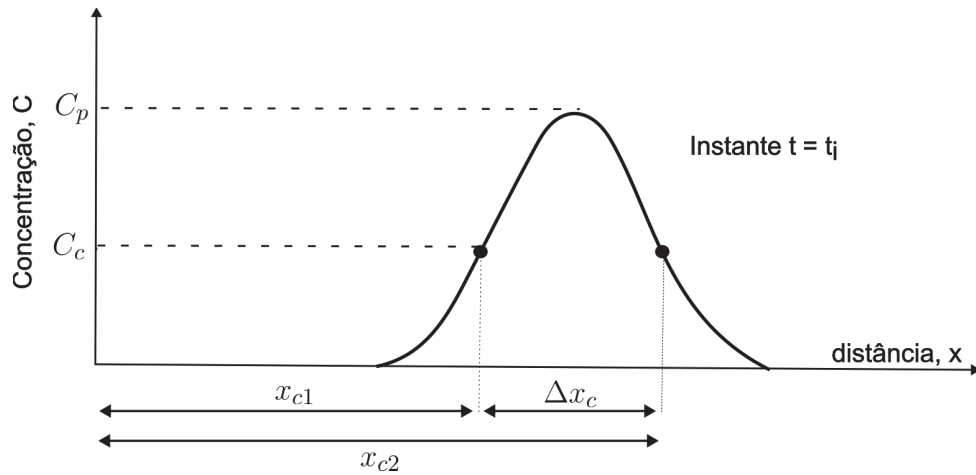


Figura 6 – Perfil de concentração ao longo da distância  $x$ , num instante  $t_i$ . Fonte: Barbosa Júnior et al. (2005a).

A solução da equação 2.45 apresenta duas raízes, que representam as distâncias  $x_{c1}$  e  $x_{c2}$  (Figura 6), sendo válida se  $C_p > C_c$ , de modo que pode-se estimar a diferença das raízes como

$$x_{c2} - x_{c1} = \Delta x_c = 4\sqrt{D_L t_i \ln(C_p/C_c)}. \quad (2.46)$$

Para efeito prático, é possível substituir  $\Delta x_c$  considerando a hipótese da nuvem congelada, por meio da relação

$$\Delta t_c = \frac{\Delta x_c}{U} = \frac{\Delta x_c \cdot t_p}{x}, \quad (2.47)$$

de modo que substituindo a equação 2.47 em 2.46 e isolando  $D_L$ , obtém-se a equação

$$D_L = \frac{(\Delta t_c \cdot U/4)^2}{t_p \cdot \ln(C_p/C_c)} = \frac{\Delta t_c^2}{16t_p^3} \cdot \frac{x^2}{\ln(C_p/C_c)}. \quad (2.48)$$

A Equação 2.48 do método da coroa de concentração pode ser utilizado para diferentes perfis de concentração pelo tempo, com diferentes valores de  $C_c$ . Sendo necessário a interpolação das concentrações para determinar o intervalo de tempo entre as mesmas concentrações antes e depois do pico. Após o cálculo de  $D_L$  para diferentes conjuntos de  $\Delta t_c$  e  $C_c$  é determinado o valor médio de  $D_L$ .

### 2.2.7 Métodos indiretos

Para a estimativa do coeficiente de dispersão longitudinal por meio de métodos diretos, é necessário realizar experimentos em rios com traçadores e produzindo um perfil da concentração em função do tempo. Quando se determina o  $D_L$  utilizando os métodos indiretos, que forem originalmente obtidos experimentalmente, consideram-se as características do escoamento, como velocidade, profundidade da seção, velocidade de atrito ( $u_*$ ), largura superficial (B), entre outros. A Tabela 1 apresenta algumas das equações empíricas encontradas na literatura.

Conforme apontado por Marion e Zaramella (2006), a dispersão longitudinal de escalares em rios são fortemente afetados pela variabilidade da seção transversal, tanto em relação à rugosidade do fundo do corpo d'água, como também à geometria. Os métodos indiretos representados na Tabela 1 consideram as características médias do escoamento, não sendo aplicáveis para trechos com maior variabilidade dessas características.

Quando comparadas as equações apresentadas na Tabela 1 com os resultados obtidos por Soares, Pinheiro e Zucco (2013) pelo método da propagação, a equação desenvolvida por Fischer et al. (1979) obteve maior disparidade, enquanto a desenvolvida por Devens, Júnior e Silva (2010) se aproximou dos dados obtidos em campo. A hipótese foi que o rio em que foram realizados as medições apresentam características hidrodinâmicas semelhantes ao local utilizado por Devens, Júnior e Silva (2010).

A equação proposta por Devens, Júnior e Silva (2010) apresentou erros de ordem 10 quando comparado com as demais equações, de acordo com a série de dados utilizada por Devens, Júnior e Silva (2010). Ribeiro et al. (2010) observaram que o modelo proposto por Devens, Júnior e Silva (2010) foi idealizada para cursos d'água de pequeno porte, com velocidade de 0,1 a 0,6 m/s e profundidade 0,02 a 1,37 m, subestimando significativamente

Tabela 1 – Equações para estimativa do coeficiente de dispersão longitudinal.

| Equação                                                                                                                                                                                                                    | Observações                                                     | Referência                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| $D_L = \alpha_E H u_*$                                                                                                                                                                                                     | $\alpha_E = 5,93$                                               | Elder (1959)                   |
| $D_L = 0,058 \frac{Q}{SB}$                                                                                                                                                                                                 | $Fr < 0,5$                                                      | McQuivey e Keefer (1974)       |
| $D_L = \beta \frac{U^2 B^2}{H u_*}$                                                                                                                                                                                        | $0,001 \leq \beta \leq 0,06$                                    | Liu (1977)                     |
| $D_L = 0,011 \frac{U^2 B^2}{H u_*}$                                                                                                                                                                                        | -                                                               | Fischer et al. (1979)          |
| $D_L = 5,915 \left(\frac{B}{H}\right)^{0,62} \left(\frac{U}{u_*}\right)^{1,428} H u_*$                                                                                                                                     | $0,13 < U < 1,74 \text{ m/s}$<br>$0,22 < H < 19,94 \text{ m}$   | Seo e Cheong (1998)            |
| $D_L = \frac{0,15}{8\epsilon_{t0}} \left(\frac{B}{H}\right)^{5/3} \left(\frac{U}{u_*}\right)^2 H u_*$<br>$\epsilon_{t0} = 0,145 + \left(\frac{1}{0,520}\right) \left(\frac{U}{u_*}\right) \left(\frac{B}{H}\right)^{1,38}$ | $0,13 < U < 1,74 \text{ m/s}$<br>$0,22 < H < 19,94 \text{ m}$   | Deng, Singh e Bengtsson (2001) |
| $D_L = 10,612 H U \frac{U}{u_*}$                                                                                                                                                                                           | $B/H > 50$                                                      | Kashefipour e Falconer (2002)  |
| $D_L = \left[ 7,428 + 1,775 \left(\frac{B}{H}\right)^{0,62} \left(\frac{u_*}{U}\right)^{0,572} \right] \frac{H U^2}{u_*}$                                                                                                  | $B/H < 50$                                                      | Kashefipour e Falconer (2002)  |
| $D_L = 0,729 U^{0,774} B^{1,031} S^{0,036} H^{-0,151}$                                                                                                                                                                     | $0,083 < U < 0,598 \text{ m/s}$<br>$0,019 < H < 1,37 \text{ m}$ | Devens, Júnior e Silva (2010)  |

Notas:  $\alpha_E$  é uma constante de dispersão adimensional,  $H$  é a profundidade média do escoamento (m),  $u_*$  é a velocidade de atrito ( $\text{ms}^{-1}$ ) calculada como  $\sqrt{gHS}$ ,  $Fr$  número de Froude,  $Q$  é a vazão média ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ),  $S$  é a declividade (m/m),  $B$  é a largura da seção (m),  $\beta$  é uma função adimensional da seção transversal do canal e da velocidade,  $U$  é a velocidade média ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $R_H$  é o raio hidráulico (m) e  $\Phi$  é uma constante adimensional.

os valores resultantes para  $D_L$ , enquanto as demais equações apresentaram valores mais próximos, por serem aplicáveis para faixa de velocidade e profundidade média compatíveis.

Silva (2018) analisou a dispersão longitudinal e transversal, os melhores resultados obtidos foram com o modelo de Seo e Cheong (1998), com uma considerável dispersão da massa de efluente tanto na direção transversal como na direção longitudinal enquanto o modelo de Fischer et al. (1979) apresentou padrões semelhantes, porém mais distantes dos valores experimentais.

De forma equivalente, Oliveira (2013) obteve resultados mais assertivos na determinação de  $D_L$  quando o local dos dados apresentaram características similares com os utilizados na elaboração das equações. As equações que mais se aproximaram foram as de Deng, Singh e Bengtsson (2001) e Devens, Júnior e Silva (2010). O autor elaborou uma tabela com as

faixas de valores de vazão, velocidade, largura, profundidade e declividade para as equações de Devens, Júnior e Silva (2010), Ribeiro et al. (2010), Devens (2006), Kashefipour e Falconer (2002), Deng, Singh e Bengtsson (2001) e Seo e Cheong (1998), com base nos valores que foram desenvolvidas.

Eiger (1991) destaca que as equações parametrizadas apresentadas na Tabela 1, devem ser utilizadas com cautela, na ausência de dados medidos no local de interesse. Existe uma dificuldade em estabelecer uma equação única para obter o  $D_L$ , a qual se deve pelas características irregulares dos corpos d'água e a ausência de parâmetros importantes para a determinação da dispersão (SOARES; PINHEIRO; ZUCCO, 2013; DEVENS; JÚNIOR; SILVA, 2010).

## 2.3 Panorama da determinação do $D_L$

O  $D_L$  é um parâmetro importante a ser considerado em modelos matemáticos para projetar emissários, avaliar condições de lançamento de efluentes como também avaliar riscos de acidentes de vazamentos de poluentes em corpos d'água (DENG; SINGH; BENGTSSON, 2001). Por conta da sua importância, existem diferentes métodos para sua determinação como descritos na seção 2.2. Os métodos indiretos buscam simplificar o seu cálculo, mas acabam desconsiderando características e especificidades importantes dos rios, o que potencialmente resulta em imprecisões, como apontado por Barbosa Júnior et al. (2005b), Devens, Júnior e Silva (2010), Ribeiro et al. (2010) e Soares, Pinheiro e Zucco (2013).

Kim et al. (2011) realizaram um experimento com traçador radioisótopo para estimar o coeficiente de dispersão, na região sudeste da Coreia. Kim et al. (2011) elaboraram modelos numéricos para simular os fluxos e distribuições da concentração do traçador para comparar com os dados medidos e os resultados de coeficientes de dispersão com os métodos dos momentos, o da propagação e os analíticos. As distribuições calculadas concordaram bem com o uso dos coeficientes determinados pelo método dos momentos.

Para a determinação de  $D_L$ , Soares, Pinheiro e Zucco (2013) utilizaram como traçador a rodamina-WT e estimaram o  $D_L$  com os métodos da propagação e o método da coroa de concentração, comparando ainda com os métodos indiretos. Soares, Pinheiro e Zucco (2013) obtiveram valores diferentes, nos rios com maiores vazões,  $D_L$  em torno de 4 a 17 m<sup>2</sup>/s, com o método da coroa da concentração resultando em valores maiores quando comparado com o da propagação. Os valores obtidos utilizando a equação de Devens, Júnior e Silva (2010), quando comparado com o método da propagação apresentaram maior semelhança, mas os dados de Seo e Black (2004, apud Soares, Pinheiro e Zucco (2013)), que são de rios de grande porte, a equação Fischer et al. (1979) se aproximou mais do método da propagação, com  $D_L$  em torno de 5 a 40 m<sup>2</sup>/s.

Barbosa Júnior et al. (2005b) concluíram que os métodos diretos baseados na equação da advecção-dispersão (Equação 2.29), método da propagação, método do pico da concentração

e o método da coroa da concentração apresentam resultados mais confiáveis, com os métodos método do pico da concentração e o método da coroa da concentração sendo mais rápidos por poderem utilizar dados de apenas uma seção do rio. E, ao contrário do observado por Soares, Pinheiro e Zucco (2013), o método da propagação apresentou valores maiores do que o método da coroa da concentração.

A equação proposta por Devens, Júnior e Silva (2010) foi comparada com o resultado experimental obtido com o método da propagação e as equações citadas na Tabela 1, utilizando dados de cursos d'água pequenos, na região de Ouro Preto (MG) e São Carlos (SP). Devens, Júnior e Silva (2010) destacaram a discrepância nos resultados, por conta da diferença dos cursos de água naturais, e que a equação proposta para pequenos rios apresenta resultados satisfatórios quando comparado com o método da propagação.

Assim como descrito para determinar o coeficiente de reaeração, para a determinação do coeficiente longitudinal, os métodos diretos apresentam melhores resultados, mas demandam custos e logística maiores. Em contra partida os métodos indiretos, utilizando as equações parametrizadas encontradas na literatura, resultam em erros pelas equações se basearem em características específicas do sistema fluvial utilizado, que variam com a região.

Outra estratégia para se estimar o coeficiente de dispersão longitudinal de dá pela calibração de um modelo hidrodinâmico unidimensional aos resultados experimentais utilizando traçadores, como proposto por Silva, Pecly e Azevedo (2017), que comparou os traçadores fluorescentes de Uranina e Amidorodamina G e determinou  $D_L$  com o software Hydrologic Engineers Center - River Analysis System (HEC-RAS).

Lima (2009) comparou a solução numérica da Equação 2.29, com o método dos momentos e com Transient Storage model (TS), com o TS se aproximando mais do resultado real, por ser um modelo mais realista e considerar locais em que o rio forma zonas estagnadas em que modifica a velocidade. O trabalho de Rodrigues et al. (2013) utilizou um modelo que incorporou o efeito de zonas estagnadas, denominadas como zona morta de dispersão, apresentando resultados satisfatórios quando comparado com os resultados de um estudo num rio pequeno de montanha e melhor desempenho quando comparado com o método de Chatwin e do pico. Por ser construído de forma a estimar a vazão do rio, visto que métodos clássicos utilizam esse parâmetro e são sensíveis a ele.

Launay et al. (2015) utilizaram modelos hidráulicos unidimensionais de redes fluviais para calibrar a dispersão de poluentes, com resultados experimentais utilizando o método dos momentos, comparando com os valores obtidos de dispersão longitudinal pela integração da Equação 2.31, obtido com o campo de velocidade medido por perfiladores hidroacústicos (ADCP). Os resultados dos experimentos com traçador apresentaram distorção, até mesmo em locais onde não ocorre armazenamento transitório, a assimetria geralmente está relacionada ao processo de mistura na zona advectiva (RUTHERFORD, 1994). O coeficiente de dispersão foram consistentes com os dados encontrados na literatura.

Em relação ao método utilizando ADCP, os valores estavam em concordância com os experimentos com traçador, sendo um método promissor para melhorar a calibração dos coeficientes de dispersão.

Tenebe et al. (2016) realizaram uma revisão bibliográfica sobre os diferentes métodos para a determinação de  $D_L$ , na qual destacaram que experimentos utilizando traçadores exigem longos períodos de amostragens e apresentam alto custo. Observaram que existem novos estudos buscando alternativas para a estimativa de  $D_L$ , como análise de regressão e rede neural, mas que são propensos a erros como os métodos indiretos, por conta das aproximações consideradas.

Tayfur e Singh (2005) utilizaram rede neural para estimar  $D_L$  a partir de variáveis de fluxo e características geométricas do canal, apresentando resultados satisfatórios quando comparado com dados medidos em 29 riachos e rios nos Estados Unidos, sendo superior aos métodos indiretos apresentados na Tabela 1, pelo critério da raiz do erro quadrático médio.

## 2.4 Transporte de massa com processo reativo

Uma análise importante a ser considerada quando se utilizam modelos de qualidade de água, é se a substância em análise é conservativa ou não. Uma substância é dita não conservativa se sofre reações cinéticas de produção, degradação/remoção e sedimentação (ROSMAN et al., 2015). Segundo Deng, Bengtsson e Singh (2006), os processos de dispersão em rios podem ser acompanhados por reações ( $\bar{R}_c$ ), sejam elas de fonte ou sumidouros. Por conta disso pode-se adicionar o termo dessas reações na equação 2.29, de modo que

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \pm \sum \bar{R}_c. \quad (2.49)$$

A maioria das substâncias acabam reagindo nos corpos d'água, como por exemplo quando ocorre o lançamento de um efluente com alta carga de matéria orgânica, ocorre reações de consumo e produção de oxigênio dissolvido (OD), convertendo os compostos orgânicos em compostos inertes (SPERLING, 1996), por conta disso, deve ser analisado em conjunto os fenômenos físicos e químicos em modelos de qualidade de água.

### 2.4.1 Balanço de massa do oxigênio dissolvido

O modelo de Streeter-Phelps considera dois mecanismos primários que influenciam no ciclo do oxigênio dissolvido nos rios, que são a decomposição da matéria orgânica e a reaeração do OD. O balanço de massa da demanda bioquímica do oxigênio (DBO) e do OD, considerando hipóteses simplificadores como escoamento permanente e não dispersivo, pode ser representando pelas equações

$$U \frac{dD}{dx} = K_d L - K_a D, \quad (2.50)$$

$$U \frac{dL}{dx} = -K_r L, \quad (2.51)$$

que é conhecida como a forma mais simples do modelo clássico de Streeter-Phelps (CHAPRA, 2008). Nas Equação 2.50 e 2.51,  $U$  representa a velocidade do escoamento (m/s),  $D$  é o deficit de OD (mg O<sub>2</sub>/L),  $x$  é a distância desde a fonte (m),  $L$  é a concentração da DBO (mg/L),  $K_d$  é o coeficiente de degradação de DBO (1/dia),  $K_a$  é o coeficiente de reaeração (1/dia),  $K_r$  é a taxa de decaimento total da matéria orgânica (1/dia), que é a soma dos coeficientes de sedimentação ( $K_s$ ) e o de  $K_d$ .

O deficit de OD,  $D$ , é definido como

$$D = C_{ODsat} - C_{OD}, \quad (2.52)$$

onde  $C_{ODsat}$  representa a concentração de saturação de oxigênio dissolvido e  $C_{OD}$  é a concentração de oxigênio dissolvido no rio. Essa relação está esquematizada na Figura 7, considerando que a  $C_{ODsat}$  não varia ao longo do tempo, com a temperatura, a altitude e a salinidade constante. Desta forma conforme a concentração de OD aumenta ao longo do tempo o déficit diminui.

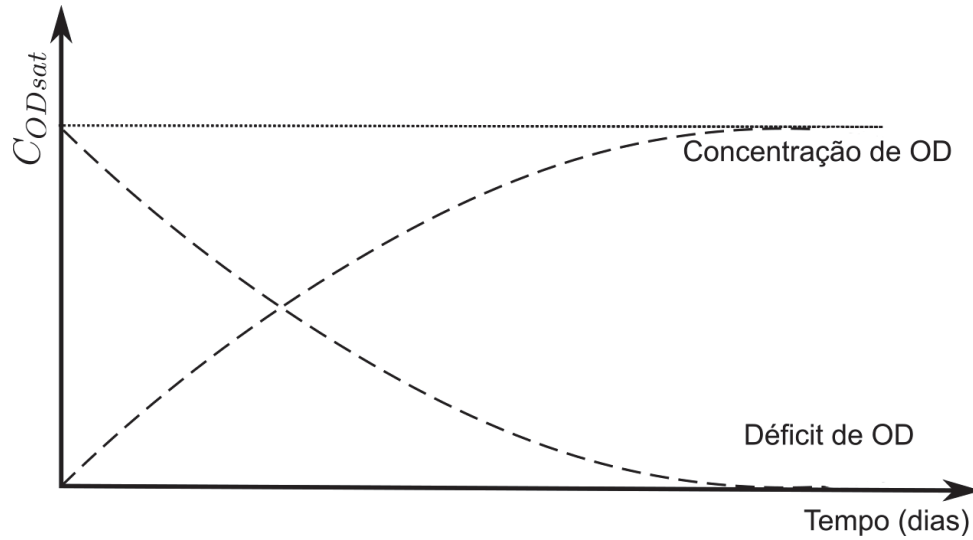


Figura 7 – Progressão temporal da concentração e do déficit de oxigênio dissolvido, considerando a concentração de saturação constante ao longo do tempo. Fonte: Sperling (1996).

Conforme apresentado por Chapra (2008), a solução analítica das equações 2.51 e 2.50, considerando o lançamento de uma fonte pontual de DBO e valores específicos de concentrações iniciais é dado por

$$L = L_0 e^{-\frac{K_r}{U} x}, \quad (2.53)$$

$$D = D_0 e^{-\frac{K_a}{U}x} + \frac{K_d L_0}{K_a - K_r} (e^{-\frac{K_r}{U}x} - e^{-\frac{K_a}{U}x}), \quad (2.54)$$

onde  $L_0$  e  $D_0$  representam as condições iniciais de DBO (mg/L) e o déficit de oxigênio, respectivamente.

A Figura 8 apresenta o perfil do oxigênio dissolvido. Quando ocorre o despejo do efluente no rio, o oxigênio dissolvido diminui por conta da degradação da matéria orgânica e com isso o déficit de OD aumenta até chegar no déficit crítico ( $D_c$ ), que é o ponto onde ocorre o mínimo da concentração de oxigênio ( $C_c$ ). Após atingir essa situação crítica, a produção de OD supera o consumo e há tendência de atingir o equilíbrio novamente.

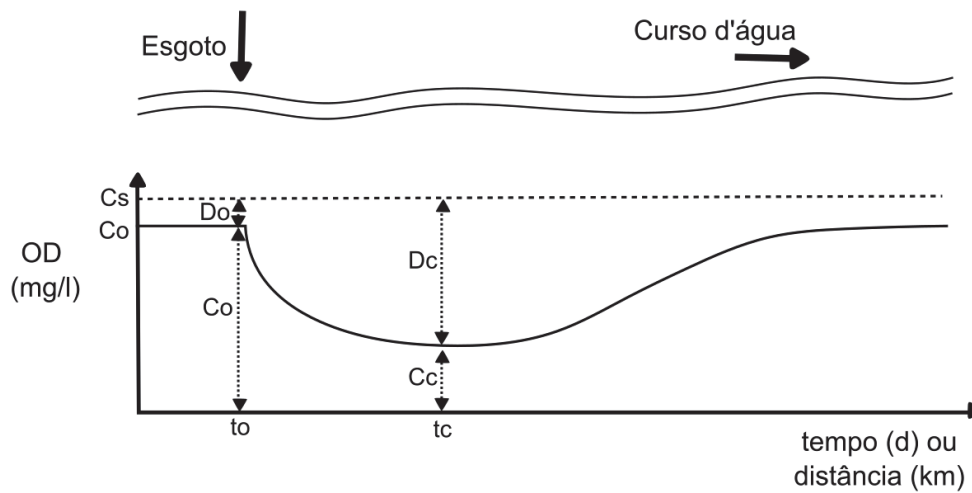


Figura 8 – Balanço da concentração do OD em um rio, com destaque para o perfil do oxigênio dissolvido. Fonte: Sperling (1996).

A redução de oxigênio dissolvido é observada no processo de degradação da matéria orgânica, com isso o teor de oxigênio e o déficit de OD são parâmetros importantes para avaliar a qualidade da água dos rios, na Figura 7 apresenta a relação da concentração de OD com o déficit de OD num sistema fechado. As consequências do déficit de OD são os desequilíbrios ecológicos do meio aquático. Segundo Wilcock et al. (2011), o metabolismo do ecossistema, que consiste na combinação da fotossíntese e a respiração dos seres vivos presentes no corpo d'água, é um indicador importante da saúde do ecossistema de um rio.

A oxidação da matéria orgânica não é a única responsável por essa diminuição, a demanda bentônica e a nitrificação também influenciam no processo (GRAEPIN, 2016). Os principais fenômenos relacionados com o balanço de OD são apresentados na Figura 9. A demanda bentônica é demanda de oxigênio pela camada superior de lodo formada no fundo do rio, que é a parte que tem contato com o oxigênio e também quando o lodo

não está estabilizado e ocorre o revolvimento para o rio. O processo de nitrificação é a oxidação das formas nitrogenadas, a reação consome oxigênio.

Além dos processos de consumo, existem os de transferência e produção de oxigênio. Um deles é o processo de reaeração atmosférica, que é a transferência de gases entre o ar e a água, e o outro é a fotossíntese. A fotossíntese é o processo no qual os seres autotróficos, quando na presença de energia luminosa e  $CO_2$ , realizam a síntese da matéria orgânica e com isso produzem oxigênio.

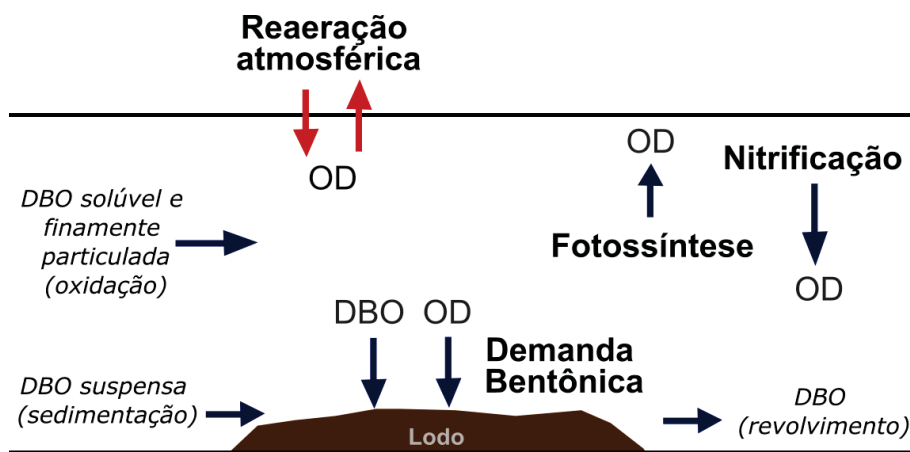


Figura 9 – Processos de produção, transferência e consumo de oxigênio dissolvido na água.  
Fonte: Graepin (2016).

### 2.4.2 Processo de transferência de gases na interface ar-água

A reaeração é envolve o processo de incorporação de oxigênio na água, esse fenômeno ocorre na interface entre a atmosfera e a superfície de água. A transferência de gases ocorre quando a pressão parcial do gás na atmosfera e a concentração na fase aquosa não estiverem em equilíbrio. A Lei de Henry fornece meios para quantificar a condição de equilíbrio entre a atmosfera e o meio líquido, especificando que no equilíbrio a razão entre a concentração gasosa e a água será mantida em um valor que depende essencialmente da temperatura (CHAPRA, 2008).

A solubilidade do oxigênio na água está relacionada com as condições de temperatura, pressão e salinidade da água, dada pela concentração de saturação de OD ( $C_{ODsat}$ ). A Figura 10 indica a variação de  $C_{ODsat}$  em relação a altitude e a temperatura.

A equação proposta por APHA (2005) pode ser utilizada para calcular a  $C_{ODsat}$  em função da temperatura da água doce, e à pressão atmosférica de 1 atm na forma

$$\ln(C_{ODsat}(T)) = -139,34411 + \frac{1,575701 \cdot 10^5}{T_a} - \frac{6,642308 \cdot 10^7}{T_a^2} + \frac{1,2438 \cdot 10^{10}}{T_a^3} - \frac{8,621949 \cdot 10^{11}}{T_a^4}, \quad (2.55)$$

onde  $T_a$  é a temperatura da água em Kelvin.

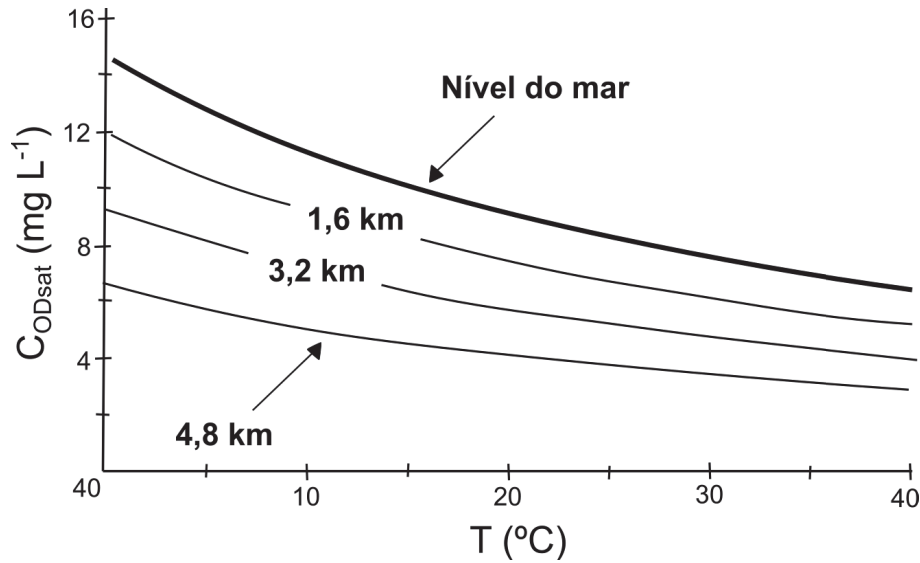


Figura 10 – Concentração de saturação do oxigênio dissolvido na água em relação a variação da temperatura da água para diferentes altitudes conforme as equações 2.55 e 2.56. Adaptado de Chapra (2008).

Utilizando o valor de  $C_{ODsat}$  encontrado pela Equação 2.55, pode-se corrigir a concentração pela elevação acima do nível médio do mar em km ( $h$ ). Uma aproximação utilizada é a de Zison (1978), que se baseia na expressão

$$C_{ODsat} = C_{ODsat}(T)(1 - 0,1148h). \quad (2.56)$$

Os mecanismos responsáveis pela transferência do oxigênio são a difusão molecular e a turbulenta; a molecular é um processo mais lento e ocorre em ambientes tranquilos sem correntezas, enquanto a turbulenta é mais eficiente, pois envolve a mistura e renovação de interfaces, evitando pontos de saturação (SPERLING, 1996).

Segundo Hemond e Fechner (2014), a difusão molecular é o movimento aleatório das moléculas de  $O_2$ , do meio concentrado para o de menor concentração, com maior importância em escala microscópica das reações químicas e biológicas. Os principais fatores que afetam a difusão molecular são a temperatura e o gradiente de concentração (NUNES, 2008).

Para explicar a dinâmica da transferência de oxigênio entre a interface ar-água existem três modelos teóricos: o modelo de dois filmes, modelo da penetração e o da renovação superficial (GONÇALVES et al., 2020).

O modelo dos dois filmes proposto por Lewis e Whitman (1924), consiste hipótese que existem dois filmes, o gasoso e o líquido, e que a transferência por difusão molecular de massa ocorre enquanto não estiverem em equilíbrio. Para esse modelo acaba sendo difícil estimar a transferência dos gases, por conta das hipóteses de fluxo ser laminar e condições de estado estacionário, sendo mais indicado em águas calmas (CHAPRA, 2008; GONÇALVES, 2012).

Elaborado por Higbie em 1935 (apud Gonçalves (2012)), o modelo da penetração considera turbilhões no escoamento, descartando a hipótese de filmes estacionários de Lewis e Whitman (1924). A dinâmica do modelo é que por meio dos turbilhões, o oxigênio da atmosfera penetra no líquido, alcançando regiões mais profundas e não apenas superficiais. Segundo Gonçalves et al. (2020), o modelo também torna difícil de estimar a transferência de gases, pois é necessário estimar o tempo médio de contato da parcela líquida na interface.

O modelo de renovação superficial, desenvolvido por Danckwerts (1951), a partir do modelo de penetração, considera como parâmetro a turbulência, ou seja, ao invés de considerar um tempo médio de contato considera que tempo ocorre de forma aleatória. Por considerar a turbulência aumenta a complexidade do modelo (GONÇALVES et al., 2020).

Os modelos simples apresentam dificuldades e a taxa de transferência global ( $K_a$ ) é determinada por outras técnicas, que serão apresentadas a seguir.

## 2.5 Métodos de determinação do coeficiente de reaeração

O coeficiente de reaeração ( $K_a$ ) é um parâmetro que relaciona a interação de fatores difusivos com fenômenos turbulentos na interface ar-água (SILVA et al., 2020). Segundo Gonçalves et al. (2020) é de extrema importância para definir a capacidade de autodepuração dos corpos d'água. Para o lançamento de um efluente tratado ou não em um corpo receptor em que se considera o fenômeno da autodepuração como parâmetro para definir o grau de tratamento necessário, para que o corpo d'água não atinja déficit mínimo do local. Caso  $K_a$  seja subestimado, o tratamento escolhido pode ser mais eficiente do que o necessário, e se for superestimado o tratamento pode ser insuficiente, ocasionando problemas financeiros ou de adequamento com o CONAMA 357 (BRASIL, 2005).

O  $K_a$  é um coeficiente de maior sensibilidade quando comparado com os outros utilizados no modelo de Streeter-Phelps. Possui uma faixa de variação típica em rios ou canais de 0,1 a 100 d<sup>-1</sup> (MATEUS et al., 2015), por conta disso a sua importância para estimá-lo de forma correta. Existem diferentes maneiras de se obter o valor para o coeficiente de reaeração para subsidiar um estudo/análise ambiental. Os valores tabelados representam um guia de orientação de referência de valores típicos (Tabela 2); enquanto equações parametrizadas procuram relacionar características do leito e hidráulica do canal por meio de experimentos que serão abordados nas próximas seções.

Pode-se observar na Tabela 2 que o valor de  $K_a$  está relacionado com a velocidade e profundidade do rio, quanto mais veloz e mais raso, maior o coeficiente, por conta da maior facilidade de mistura da água (SPERLING, 1996).

Tabela 2 – Valores para  $K_a$  para 20°C

| Corpo d'água                       | $K_a$ (1/dia) |       |
|------------------------------------|---------------|-------|
|                                    | Profundo      | Raso  |
| Pequenas lagoas                    | 0,12          | 0,23  |
| Rios vagarosos, grandes lagos      | 0,23          | 0,37  |
| Grandes rios com baixa velocidade  | 0,37          | 0,46  |
| Grandes rios com velocidade normal | 0,46          | 0,69  |
| Rios rápidos                       | 0,69          | 1,15  |
| Corredeiras e quedas d'água        | >1,15         | >1,61 |

Fonte: Sperling (1996)

Como usualmente os valores de  $K_a$  são apresentados para a temperatura de 20°C e é comum expressar a variação pela relação potencial, com o valor para  $\theta$  de 1,024 (SPERLING, 1996) como

$$K_{aT} = K_{a20}\theta^{T-20}. \quad (2.57)$$

Além dos valores tabelados, pode-se obter o coeficiente de reaeração por meio de diferentes métodos experimentais ou utilizando equações parametrizadas encontradas na literatura. Os métodos experimentais que serão apresentados são os métodos: dos traçadores gasosos, da sonda solúvel flutuante, da pressão sonora e o delta aproximado.

Além dos métodos experimentais e das equações parametrizadas, existem outras formas de estimar o coeficiente de reaeração, através da calibração de modelos de autodepuração. Os estudos de Araújo, Santos et al. (2014), Friguis, Guimarães e Ferreira (2017) e Bezerra, Mendonça e Frischkorn (2008) estimaram o  $K_a$  utilizando o modelo de Streeter Phelps. Para a calibração do modelo é necessário ter dados das condições de contorno e, pela entradas de efluente ao longo do rio, ter os valores do deficit de OD e da DBO ao longo do percurso. Desta forma, é possível calibrar o modelo de forma que minimize os erros, com isso obtendo os coeficientes necessários para o método.

### 2.5.1 Método dos traçadores gasosos

Segundo Graepin (2016), o método dos traçadores gasosos apresenta um custo elevado, quando comparado aos outros métodos experimentais, mas apresenta maior confiabilidade. Para a obtenção do  $K_a$ , o método utiliza a relação entre a taxa de dessorção do gás traçador injetado e a taxa de absorção de oxigênio na mesma amostra de interesse, não importando as condições de temperatura e mistura (RATHBUN; GRANT, 1978). O método consiste na injeção simultânea de um traçador gasoso e um outro conservativo de referência não gasoso; o traçador gasoso tem como objetivo simular a troca gasosa na interface da superfície d'água e atmosfera, sendo proporcional a absorção do oxigênio pelo rio, enquanto o conservativo tem o objetivo de ajustar a concentração do gás, corrigindo efeitos de

dispersão e diluição (FORMENTINI, 2010). Antigamente se utilizava um traçador gasoso radioativo, mas para evitar riscos de exposição aos corpos d'água a radiação, foi substituído gradualmente pelo etileno e propano (ÁVILA, 2014).

### 2.5.2 Método da sonda solúvel

De acordo com Bicudo e James (1991) e Costa (2000), o método da sonda solúvel foi desenvolvido por Giorgetti e Giansanti (1983) e posteriormente aperfeiçoado. O método da sonda solúvel flutuante consiste basicamente na estimativa indireta da transferência do oxigênio em água a partir da dissolução de uma pastilha fina de ácido benzoico flutuando no corpo d'água, partindo da hipótese de que a velocidade de dissolução da sonda solúvel é influenciada pela turbulência do escoamento (FORMENTINI, 2010; FERREIRA et al., 2019). Segundo Graepin (2016), Bicudo e James (1991) e Ferreira et al. (2019), o método da sonda solúvel é uma técnica alternativa, de baixo custo e não se limita a regimes de fluxo unidirecional, porém é menos preciso quando comparado com os outros métodos experimentais.

### 2.5.3 Método da pressão sonora

O método da pressão sonora foi desenvolvido por Morse et al. (2007), utilizando a premissa que a pressão sonora média de um trecho d'água é dependente da turbulência, assim como o coeficiente de reaeração. Segundo Morse et al. (2007), para a determinação da pressão sonora para cada trecho do rio é necessário medir o comprimento, o nível sonoro e o ruído. A divisão dos trechos dos rios é feita pela observação das características geomorfológicas do local a ser analisado. Depois de medida a pressão sonora em cada trecho, é feita a ponderação de acordo com o comprimento total local analisado, encontrando assim, a relação linear entre  $K_a$  e a pressão sonora média ponderada.

### 2.5.4 Método Delta

O método delta aproximado foi desenvolvido por McBride e Chapra (2005), a partir de uma adaptação do método delta originalmente desenvolvido por Chapra e Toro (1991). O método delta relaciona três processos: o de reaeração, produção primária e respiração, para obter o coeficiente de reaeração por meio de medições diurnas do oxigênio dissolvido. A solução do método apresenta uma expressão analítica transcendental, por conta disso, são apresentados gráficos com os resultados ou equações ajustadas (FORMENTINI, 2010), que serão apresentadas na próxima seção.

McBride e Chapra (2005) aproximaram as equações das curvas obtidas por Chapra e Toro (1991), utilizando a relação entre os parâmetros originais propostos como forma de simplificar a solução. A Figura 11 apresenta as curvas de produção primária (fotossíntese), respiração, concentração de OD e o déficit de OD consideradas em ambos os métodos.

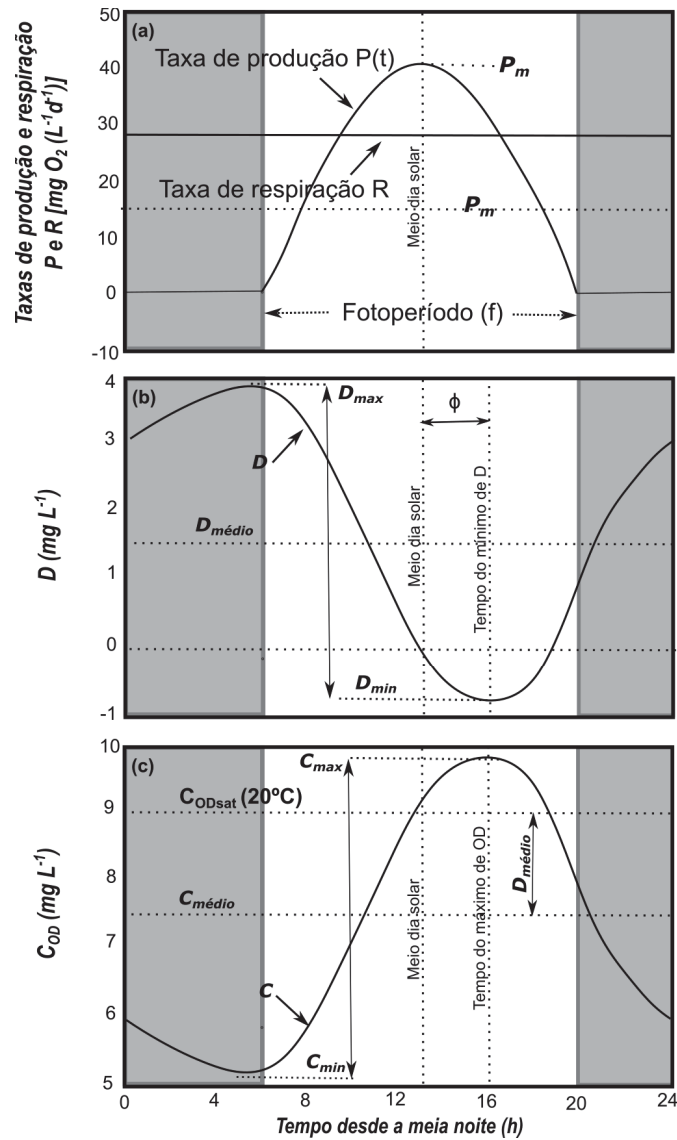


Figura 11 – (a) Produção e respiração ao longo do dia, (b) déficit de oxigênio dissolvido ao longo do dia e (c) consumo de oxigênio dissolvido ao longo do dia. Fonte: McBride e Chapra (2005).

O método utiliza a equação

$$\frac{dD}{dt} + K_a D = R - P(t), \quad (2.58)$$

onde  $t$  representa o tempo (h),  $K_a$  o coeficiente de reaeração ( $\text{h}^{-1}$ ),  $R$  a taxa de respiração [ $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}\text{h}^{-1}$ ] e  $P$  é a taxa da produção primária das plantas (fotossíntese) [ $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}\text{h}^{-1}$ ].

A curva da taxa de produção apresentada na Figura 11a é definida por

$$P(t) = P_m \max \left[ \sin \left( \frac{\pi t}{f} \right), 0 \right], \quad (2.59)$$

no qual  $P_m$  é máximo da produção no tempo em que  $t = f/2$ . Considera-se o nascer do sol como  $t=0$  e o fotoperíodo  $f$  (h) como o período do nascer até o pôr do sol.

As soluções analíticas da Equação 2.58 obtidas por Chapra e Toro (1991) apresentam uma solução para o dia ( $0 \leq t \leq f$ ) (Equação 2.60) e outra para a noite ( $f \leq t \leq T$ ) (Equação 2.61), descritas respectivamente como

$$D_1(t) = \frac{R}{K_a} - \sigma \left[ \sin \left( \frac{\pi t}{f} - \theta \right) + \gamma e^{-K_a t} \right], e \quad (2.60)$$

$$D_2(t) = \frac{R}{K_a} - \sigma [\sin \theta + \gamma e^{-K_a f}] e^{-K_a(t-f)} \quad (2.61)$$

Com  $T$  representando a duração do dia, 24 horas, e os grupos de parâmetros são dados por

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\pi}{K_a f} \right) \quad (2.62)$$

$$\gamma = \sin(\theta) \left[ \frac{1 + e^{-K_a(T-f)}}{1 - e^{K_a T}} \right], e \quad (2.63)$$

$$\sigma = \frac{P_m}{\sqrt{K_a^2 + \left( \frac{\pi}{f} \right)^2}} \quad (2.64)$$

McBride e Chapra (2005) utilizaram a Equação 2.60 buscando o valor da hora do dia em que  $D$  é mínimo, isto é,  $\frac{dD}{dt} = 0$ , resultando em

$$\pi \cos \left[ \pi \left( \frac{1}{2} + \frac{\phi}{f} - \theta \right) \right] - (K_a f) \gamma e^{-K_a(\phi+f/2)} = 0 : \phi > 0, \quad (2.65)$$

onde,

$$\phi = t_{min} - t_f, \quad (2.66)$$

em que  $\phi$  representa o tempo entre o déficit mínimo ( $t_{min}$ ) e o meio dia solar ( $t_f$ ). Por meio dessa solução, McBride e Chapra (2005) ajustaram o coeficiente de reaeração como

$$K_a = 7,5 \left( \frac{5,3\eta - \phi}{\eta\phi} \right)^{0,85}, \quad (2.67)$$

onde o fator de correção do fotoperíodo ( $\eta$ ) pode ser calculado por

$$\eta = \left( \frac{f}{14} \right)^{0,75}. \quad (2.68)$$

Na Figura 12 apresenta o resultado de  $K_a$  obtido pela equação 2.65 e o método delta aproximado (Equação 2.67 e 2.68), onde pode-se observar maior discrepância nos métodos em  $K_a$  pequenos e com o fotoperíodo igual a 16 horas.

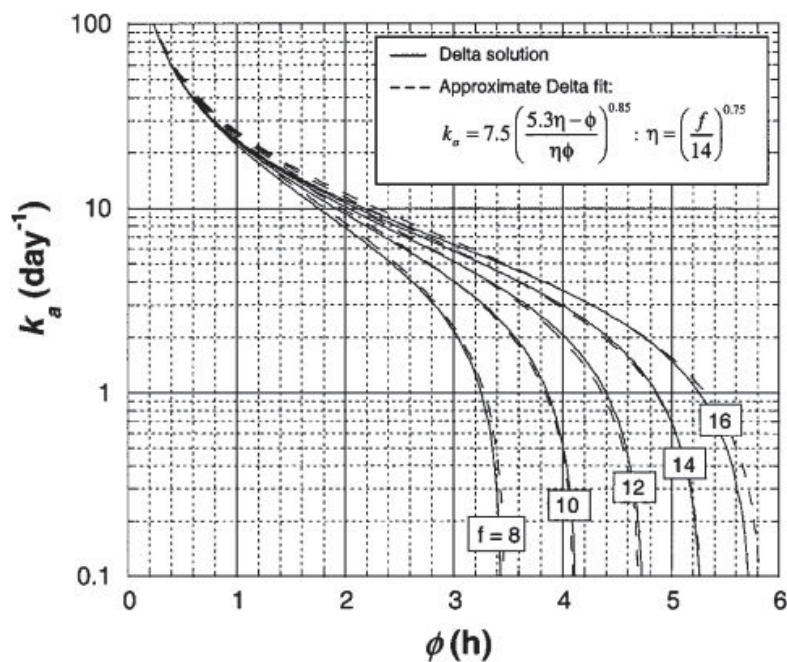


Figura 12 – Comparação do método delta e o método delta aproximado. Fonte: McBride e Chapra (2005).

### 2.5.5 Equações parametrizadas

Existem diferentes equações disponibilizadas na literatura para prever o coeficiente de reaeração que relaciona com a profundidade e a velocidade do curso d'água (SPERLING, 2005). Essas equações são parametrizadas a partir de experimentos em situações específicas, e por conta disso, não podem ser aplicadas indiscriminadamente em todos os casos (Tabela 3).

Sperling (2005) e Queiroz, Matos e Sperling (2015) analisaram as equações de O'Connor e Dobbins (1958), Churchill, Elmore e Buckingham (1964), Owens, Edwards e Gibbs (1964), Langbein e Durum (1967), Tsvoglou e Wallace (1972), Smoot (1988) e Melching e Flores (1999), comparando os resultados com os gerados pelo modelo QUAL2E e com resultados experimentais. Concluíram que todos os métodos são indicados para estimar o coeficiente de reaeração, mas em cursos d'água rasos as equações tabeladas resultam em  $K_a$  elevados quando comparado com os valores apresentados na Tabela 2. Formentini (2010) comparou as mesmas equações, e concluiu que resultaram em alguns pontos, valores próximos, quando comparado com o ensaio de traçadores, mas também verificou  $K_a$  elevado, em escoamentos rasos.

Almeida (2013) comparou os resultados obtidos entre as equações de O'Connor e Dobbins (1958), Melching e Flores (1999) e Owens, Edwards e Gibbs (1964) em um estudo de caso no rio Uberabinha, Uberlândia-MG. Concluiu que a equação de O'Connor e Dobbins (1958) se ajustou melhor em trechos de baixa velocidade, enquanto as equações

Tabela 3 – Equações para estimativa do coeficiente de reaeração.

| Equação                                                                | Faixa de aplicação                                                                                                              | Referência                            |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| $K_a = 3,73U^{0,5}H^{-1,5}$                                            | $0,6\text{m} \leq H < 4,0\text{m}$<br>$0,05\text{ms}^{-1} \leq U < 0,8 \text{ ms}^{-1}$                                         | O'Connor e Dobbins (1958)             |
| $K_a = 5,014U^{0,969}H^{-1,673}$                                       | $0,6\text{m} \leq H < 4,0\text{m}$<br>$0,8\text{ms}^{-1} \leq U < 1,5\text{ms}^{-1}$                                            | Churchill, Elmore e Buckingham (1964) |
| $K_a = 5,34U^{0,67}H^{-1,85}$                                          | $0,1\text{m} \leq H < 0,6\text{m}$<br>$0,05\text{ms}^{-1} \leq U < 1,5\text{ms}^{-1}$                                           | Owens, Edwards e Gibbs (1964)         |
| $K_a = 5,1349UH^{-1,33}$                                               | Não informado                                                                                                                   | Langbein e Durum (1967)               |
| $K_a = 31,6U(1000S)$<br>$K_a = 15,4U(1000S)$                           | $0,03\text{m}^3\text{s}^{-1} < Q < 0,3\text{m}^3\text{s}^{-1}$<br>$0,3\text{m}^3\text{s}^{-1} < Q < 8,5\text{m}^3\text{s}^{-1}$ | Tsivoglou e Wallace (1972)            |
| $K_a = 534S^{0,6236}U^{0,5325}H^{-0,7258}$                             | Não informado                                                                                                                   | Smoot (1988)                          |
| $K_a = 517(US)^{0,524}Q^{-0,242}$<br>$K_a = 596(US)^{0,528}Q^{-0,136}$ | $Q < 0,556\text{m}^3\text{s}^{-1}$<br>$Q > 0,556\text{m}^3\text{s}^{-1}$                                                        | Melching e Flores (1999)              |

Notas:  $S$  é a declividade (m/m),  $U$  é a velocidade média ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $H$  é a profundidade (m) e  $Q$  é a vazão ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )

de Melching e Flores (1999), Owens, Edwards e Gibbs (1964) apresentaram resultados satisfatórios, mas com elevação dos valores de  $K_a$  em trechos do rio com menor lâmina d'água.

Melching e Flores (1999) afirmaram que as equações desenvolvidas de acordo com a vazão do rio em análise, fornecem estimativas confiáveis para  $K_a$ , com uma ampla faixa de condições de fluxo, com utilidade em estudos com restrições financeiras, mas ressaltando a importância de realizar medições *in situ* caso seja possível.

## 2.6 Panorama das aplicações dos métodos para determinação de $K_a$

A Tabela 2 apresenta valores médios usualmente utilizados de coeficiente de reaeração, para casos de pequenas lagoas, grandes lagos ou rios vagarosos, rios grandes com baixa velocidade, rios rápidos e corredeiras ou quedas d'água, sem especificar essas classificações. Quando existe a necessidade de estimar  $K_a$  para rio de uma forma mais precisa, tipicamente se utilizam as equações parametrizadas por meio de aproximações de dados medidos como apresentados na Tabela 3, em casos em que os rios possuem características similares aos

que foram utilizados para parametrizar, como profundidade e velocidade de escoamento.

Por meio da análise dimensional Gualtieri, Gualtieri e Doria (2002) concluíram que os modelos disponíveis na literatura não abrangem todos os parâmetros importantes que afetam o coeficiente de reaeração, como aceleração gravitacional, velocidade de atrito e coeficiente de rugosidade de Manning. Gonçalves (2012) comparou as diferentes equações (Tabela 3) e observou uma certa disparidade entre os resultados, como o modelo proposto por O'Connor e Dobbins (1958), subestimando, e o modelo de Owens, Edwards e Gibbs (1964), superestimando o coeficiente de reaeração.

Haider, Ali e Haydar (2013) compararam diferentes equações empíricas para obter o coeficiente de reaeração, apontando que esses métodos incluem diferentes variáveis em suas formulações. Em rios em que existe uma grande variação na vazão pode resultar em incertezas e precisa ser avaliada a aplicabilidade. Haider, Ali e Haydar (2013) ressaltam que o trabalho desenvolvido foi aplicado em um rio, podendo apresentar resultados diferentes para outras regiões, destacando a importância de realizar medições em campo quando houver recursos disponíveis.

Além dos valores médios tabelados (Tabela 2), ou então encontrados por meio das equações parametrizadas (Tabela 3), existe os métodos experimentais que determinam o valor do  $K_a$  para um caso específico. O método experimental amplamente conhecido e preciso é o método do traçador gasoso, quando comparado com os outros, e apresenta resultados satisfatórios, porém é um método caro e precisa de profissionais especializados (COSTA, 1999; JIN et al., 2012).

Os métodos da sonda solúvel e o da pressão sonora são mais recentes e necessitam de estudos para estabelecer uma relação teórica confiável e são menos precisos, mas apresentam um custo menor, quando comparado ao método do traçador gasoso e são mais simples de serem executados (ÁVILA, 2014; FORMENTINI, 2010; GRAEPIN, 2016; BICUDO; JAMES, 1991).

De modo geral, as equações não são recomendadas quando são necessários valores mais precisos para o coeficiente de reaeração; nesses casos é recomendado analisar experimentalmente e o método do traçador gasoso é o mais utilizado, mas apresenta custo elevado. Desta forma, o método delta aproximado é um método mais simples e indicado em casos que a turbulência e a variação do perfil de temperatura são pequenos (NGUYEN, 2013).

O método consiste em analisar o perfil do oxigênio dissolvido numa seção do rio num período de tempo, e assim, estimar o coeficiente de reaeração do rio em questão, utilizando as equações corrigidas e considerando a produção primária de oxigênio e a respiração (MCBRIDE; CHAPRA, 2005). Segundo Correa-González et al. (2014), o monitoramento contínuo de OD e temperatura numa frequência mais elevada é importante para observar padrões incomuns de OD.

## 3 Determinação do coeficiente longitudinal de dispersão em rios

### 3.1 Material e Métodos

Para a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal foi realizado o experimento de lançamento do traçador no Rio Barigui, no trecho do Parque Tingui em Curitiba-PR, Brasil. A bacia do rio Barigui está localizado recebe o mesmo nome, situado na Região Metropolitana de Curitiba, com nascentes no município de Almirante Tamandaré e a foz no rio Iguaçu na divisa dos municípios de Araucária e Curitiba, entre as coordenadas  $25^{\circ}13' - 25^{\circ}38'S$  e  $49^{\circ}15' - 49^{\circ}22'O$  (Figura 13). Na região da bacia localizada em Curitiba, encontra-se quase totalmente urbanizada, com trechos de parques como o Parque Tingui, Parque Tanguá e o Parque Barigui (LEITHOLD; SCHMIDT; FERNANDES, 2020).

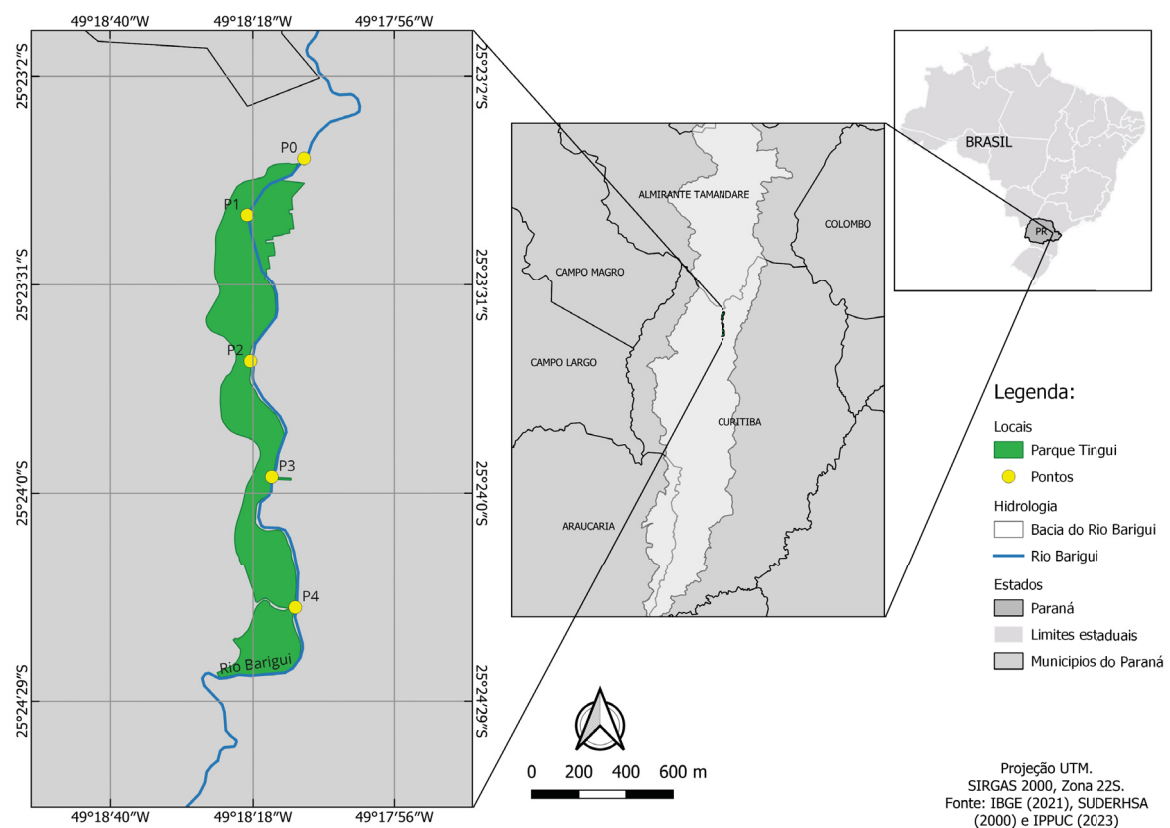


Figura 13 – Localização do parque Tingui, com a seção de lançamento do traçador (P0) e as seções de amostragem (P1, P2, P3 e P4) ao longo do rio Barigui (Curitiba/PR).

A Figura 13 apresenta o local de lançamento do traçador (P0) e as seções em que foram feitas as amostragens P1, P2, P3 e P4, com 354 m, 1047 m, 1602 m e 2292 m de

distância do P0 respectivamente. Foram escolhidas seções que estivessem localizadas após o comprimento de mistura, calculado pela Equação 2.9, estimando inicialmente  $D_L$  pela equação clássica de Fischer et al. (1979) (Tabela 1).

A Tabela 4 apresenta as datas em que foram realizados os experimentos, com as respectivas seções de amostragem e as massas do traçador lançadas. A massa do traçador lançada nos experimentos foi determinada a partir de estimativas preliminares e estabelecendo uma faixa desejável de medição do fluorímetro de 4 a 40 ppb, que foi definida de forma que as concentrações observadas estivessem longe dos limites de detecção (Figura 14). Os detalhes do procedimento e critérios para definição da massa a ser lançada são apresentados no Apêndice A.

Tabela 4 – Identificação do local de amostragem e massa do traçador lançada em cada dia do experimento.

| Ensaio | Data       | Massa do traçador (g) | Seções de amostragem |
|--------|------------|-----------------------|----------------------|
| E1     | 30/08/2022 | 20                    | P1 e P2              |
| E1.1   | 30/08/2022 | 30                    | P2                   |
| E2     | 02/09/2022 | 30                    | P2 e P3              |
| E3     | 23/11/2022 | 30                    | P2 e P4              |
| E4     | 09/02/2023 | 30                    | P2 e P4              |
| E5     | 03/05/2023 | 45                    | P2 e P4              |
| E6     | 03/05/2023 | 50                    | P2 e P4              |
| E7     | 23/05/2023 | 50                    | P2 e P4              |



Figura 14 – Ilustração da faixa de detecção do fluorímetro e a faixa desejável de medição estabelecida.

Para a determinação do perfil de concentração do traçador, foi utilizado o corante Rodamina B (Figura 15a) como traçador e a concentração foi estimada utilizando o fluorímetro AquaFluor® da Turner Designs (Figura 15b), que apresenta faixa de detecção de 0,4–400 ppb (Turner Desing, 2018). O fluorímetro foi calibrado a partir de soluções de Rodamina B dissolvida em água destilada, de acordo com os limites de detecção de 0,4 ppb a 400 ppb (Figura 15c).

Para os ensaios com injeção instantânea, foi realizado o lançamento do traçador no centro da seção P0, com a massa previamente pesada e diluída em um balde de 20 L de água (Figura 16a e 16b). Após o lançamento, foram realizadas amostragens com intervalos regulares durante a passagem da pluma em cada seção. Amostras adicionais foram coletadas para capturar os extremos da curva. As Figura 16c e 16d apresentam a

diferença na coloração do rio antes e durante a passagem da pluma do traçador, na seção do ponto P2.



Figura 15 – (a) Corante Rodamina B e (b) fluorímetro AquaFluor® da Turner Designs utilizado nos experimentos, e a (c) curva de concentração do traçador Rodamina B utilizada para calibrar o fluorímetro.



Figura 16 – Imagens do lançamento do traçador no rio Barigui (a), início da mistura (b) e no ponto P2 antes (c) e durante (d) a passagem da pluma do traçador, no dia 02/09/2022.

Ao longo dos experimentos, a quantidade de massa lançada, o período para início e fim das amostragens e o intervalo de tempo entre as coletas em cada seção foram sendo ajustados. No ponto P1, o intervalo de medições era 20 s, para o ponto P2 e P3 o intervalo era de 30 s e para o ponto P4 o intervalo era de 1 min, durante a passagem da pluma na respectiva seção.

Para a determinação dos parâmetros físicos do rio Barigui na seção do ponto P2, foi estimado a velocidade, vazão e a seção transversal, utilizando o medidor de vazão ADV FlowTracker da Sontek, nos ensaios realizados nos dias 03/05/2023 e 23/05/2023 (Tabela 5).

## 3.2 Resultados e discussões

Nessa seção são apresentados os resultados dos experimentos realizados no rio Barigui com o uso do traçador Rodamina B, com o objetivo de estimar o coeficiente de dispersão longitudinal a partir das curvas de concentração ao longo do tempo. Os primeiros experimentos foram realizados com a finalidade de analisar o comportamento do rio, buscando avaliar os melhores locais para o lançamento e a quantidade de traçador necessária para observar a dispersão do traçador.

Após uma análise preliminar nos dados, os pontos P1 e P3 foram desconsiderados para os ensaios seguintes. O ponto P1 pode ocasionar incertezas por estar próximo a zona de mistura e o intervalo de tempo necessário entre as medições ser curto, dificultando as coletas. E o ponto P3 por conta do local apresentar um alargamento no leito do rio e muitas pedras, criando bifurcações, dificultando a coleta.

As propriedades físicas medidas utilizando o medidor de vazão na seção transversal P2, nos ensaios E5, E6 e E7, estão descritas na Tabela 5. O ensaio E5 e E6, foram realizados no mesmo dia, mas em períodos diferentes, apresentando um sensível aumento da vazão no período da tarde, cerca de  $0,05\text{m}^3/\text{s}$ .

Além da utilização dos métodos para o cálculo de  $D_L$ , através do método dos momentos é possível estimar a velocidade média (Equação 2.36) e a vazão média ( $Q = \mathbf{M}_0/M$ ) do rio, e pelo método de Chatwin (Equação 2.43) é possível calcular a velocidade para cada trecho. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

A vazão obtida considerando a premissa do método dos momentos, que ocorre a conservação de massa, ocasionou em uma vazão maior do que a medida com o molinete. Quando comparada a velocidade calculada, que considera o tempo médio da passagem da pluma e a posição  $x$  de cada seção, apresentou valores próximos de velocidade estimada com o molinete. A velocidade medida pelo método de Chatwin, para os três ensaios, apresentaram valores maiores das estimadas pelo molinete e pelo método dos momentos, com a velocidade para a seção transversal P2 maior do que a velocidade da seção transversal P4.

Tabela 5 – Parâmetros obtidos pelo medidor de vazão ADV FlowTracker na seção P2.

| Parâmetros                                     | <i>Ensaio</i> |      |      |
|------------------------------------------------|---------------|------|------|
|                                                | E5            | E6   | E7   |
| Área da seção transversal P2 (m <sup>2</sup> ) | 4,31          | 4,30 | 4,76 |
| Profundidade média da seção transversal P2 (m) | 0,52          | 0,53 | 0,65 |
| Largura da seção transversal P2 (m)            | 8,3           | 8,2  | 7,3  |
| Vazão medida (m <sup>3</sup> /s)               | 1,35          | 1,40 | 1,08 |
| Velocidade média medida (m/s)                  | 0,31          | 0,33 | 0,23 |

Tabela 6 – Parâmetros obtidos pelos ensaios.

| Ensaio | Vazão (m <sup>3</sup> /s) |          | Velocidade (m/s) |                     |
|--------|---------------------------|----------|------------------|---------------------|
|        | Mét.                      | Momentos | Mét.             | Chatwin             |
| E1     | 3,14                      | 0,38     |                  | 0,36<br>(0,37-0,35) |
| E1.1   | -                         | -        |                  | 0,34                |
| E2     | 1,21                      | 0,44     |                  | 0,26<br>(0,25-0,28) |
| E3     | 2,26                      | 0,38     |                  | 0,42<br>(0,45-0,39) |
| E4     | 2,44                      | 0,33     |                  | 0,37<br>(0,38-0,36) |
| E5     | 2,17                      | 0,32     |                  | 0,38<br>(0,41-0,34) |
| E6     | 1,96                      | 0,34     |                  | 0,38<br>(0,41-0,36) |
| E7     | 1,70                      | 0,30     |                  | 0,33<br>(0,35-0,32) |

Nota: Para o método de Chatwin são apresentados os resultados médios entre as curvas da primeira e a segunda seção de medição e entre parênteses os resultados para cada curva.

A Figura 17 apresenta as curvas de passagem do traçador ao longo do tempo para cada ensaio em que foi realizado o experimento, sendo identificados por cores as seções em que foram realizados as medições conforme descrito na Tabela 4.

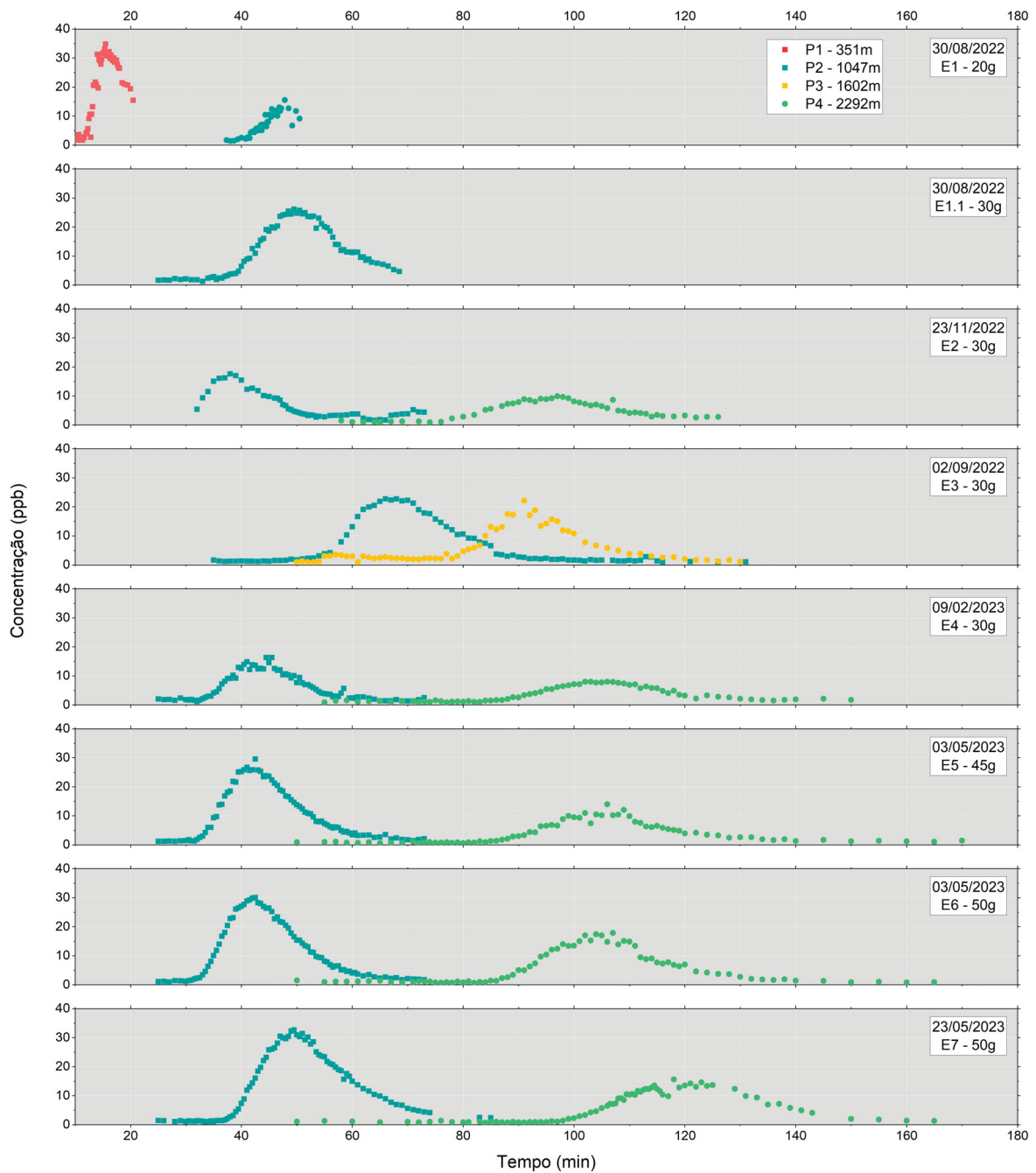


Figura 17 – Curvas de passagem do traçador Rodamina B ao longo do tempo para cada dia de experimento detalhado na Tabela 4.

No ensaio realizado no dia 30/08/2022 houve problemas durante a amostragem da passagem da pluma do traçador, no qual não há a representação da curva completa de concentração ao longo do tempo para o E1 e apenas uma curva para o E1.1, conforme apresentado na Figura 17. Neste caso, não foi possível aplicar os métodos em que precisam da curva completa e duas seções, sendo aplicáveis apenas os métodos do pico da concentração, o gráfico de Chatwin e o da coroa de concentração.

Em todos os dias foram coletadas amostras antes da passagem da pluma, e as concentrações medidas pelo equipamento foram em torno de 1 a 1,5ppb, ou seja, o rio apresenta algum traço que é detectado pelo fluorímetro. Por conta disso, foi observado a necessidade de aumentar a massa do traçador lançada, para que a curva de concentração no segundo ponto de análise escolhido (P4) apresentasse uma variação maior nos valores. Para os cálculos do  $D_L$ , foi subtraída a concentração do branco para cada amostra medida de concentração durante a passagem da pluma.

Em todos os casos as curvas apresentaram um perfil coerente com o processo físico de dispersão, mas é possível observar uma oscilação da concentração próximo ao pico em alguns casos, conforme apresentando na Figura 17, na seção P4 nos dias 30/05/2023 e 23/05/2023. Outro aspecto observado a partir dos dados medidos, é que existe um sutil aumento na concentração no final da curva, que pode estar associado à zonas estagnadas, também conhecidas como zonas mortas, que acabam retendo o traçador lançado e atrasando o transporte da massa retida.

Além disso, foi calculado a conservação de massa do traçador da primeira seção de amostragem para a segunda seção para cada ensaio. Para os dias 23/11/2022 e 09/02/2023 há um aumento de 3%, que pode ser decorrente das incertezas da medição, do tempo na coleta, da resolução temporal para integração ou mistura incompleta transversalmente. Para os demais dias observou-se perda de massa ao longo do trecho, de 20% no dia 02/09/2022, de 18% e 9% no dia 03/05/2023 e de 28% no 23/05/2023. Para os ensaios realizados no dia 30/08/2022 não foi possível calcular a conservação de massa.

Quando calculado o fator da massa recuperada (Equação 2.33), considerando a vazão medida pelo molinete (Tabela 5) constante ao longo do trecho, encontra-se os seguintes valores:  $R_{M,E5} = 0,82$ ,  $R_{M,E6} = 0,91$  e  $R_{M,E7} = 0,72$ . Os valores obtidos estão coerentes com o encontrado na literatura, como Duarte et al. (1999) que encontraram  $R_M$  na faixa de 0,55 a 0,65, Devens, Júnior e Silva (2010)  $R_M$  na faixa de 0,87 a 0,99, Soares, Pinheiro e Zucco (2013)  $R_M$  médio igual a 0,84 e Formentini (2010)  $R_M$  médio igual a 0,89, todos utilizando a rodamina B como traçador.

Os trabalhos elaborados por Davis, Atkinson e Wigley (2000), Davis e Atkinson (2000) e Atkinson e Davis (2000), tinham como objetivo analisar e estimar a dispersão longitudinal no rio Severn (Reino Unido) por meio de lançamentos com Rodamina WT. O local do experimento apresentava área da seção transversal média de 10m<sup>2</sup> e, no período do experimento, vazão média de 8m<sup>3</sup>/s, com  $R_M$  médio entre as seções de 0,97. Os autores destacaram que erros experimentais de cerca de 15% pode ser esperados no balanço de massa e que zonas mortas influenciam a dispersão da pluma de traçador.

Duarte et al. (1999) realizaram um experimento com o traçador Rodamina WT, no Rio Mondego (Portugal) e constataram, através dos resultados experimentais, uma perda de 40% da massa do traçador na primeira seção de amostragem. Tal fato pode ser explicado por conta dos fenômenos de adsorção, precipitação, retenção e a irregularidade do canal.

Para os ensaios experimentais foram utilizados os métodos diretos (método dos momentos, método da propagação, método do pico da concentração, método de Chatwin e método da coroa de concentração) para a obtenção dos valores do coeficiente de dispersão longitudinal no rio Barigui. Os resultados obtidos para cada ensaio estão apresentados na Tabela 7 e na Figura 18.

Tabela 7 –  $D_L$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) calculado com cada método para cada dia de experimento.

| Método                          | $D_L$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) - Ensaios |       |                     |                     |                      |                     |                     |                     |
|---------------------------------|-------------------------------------------|-------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                 | E1                                        | E1.1  | E2                  | E3                  | E4                   | E5                  | E6                  | E7                  |
| Método dos momentos             | -                                         | -     | 11,67               | 2,68                | 11,11                | 13,38               | 8,79                | 11,68               |
| Método da propagação            | -                                         | -     | 16,34               | 4,88                | 4,61                 | 7,72                | 4,09                | 8,85                |
| Método do pico de concentração  | 2,41<br>(1,69-3,13)                       | 2,29  | 2,91<br>(3,44-2,39) | 6,68<br>(5,44-7,93) | 8,14<br>(5,32-10,95) | 5,25<br>(3,95-6,55) | 4,61<br>(3,99-5,24) | 3,60<br>(2,34-4,86) |
| Método de Chatwin               | 1,91<br>(0,89-1,35)                       | 3,48  | 2,35<br>(2,48-2,22) | 4,49<br>(3,78-5,21) | 4,36<br>(4,50-4,22)  | 4,23<br>(2,44-6,01) | 3,13<br>(2,68-3,57) | 2,59<br>(2,31-2,87) |
| Método da coroa de concentração | -                                         | 3,167 | 2,53<br>(2,48-2,59) | 3,13<br>(2,33-3,94) | 3,94<br>(2,86-5,02)  | 4,92<br>(3,61-6,22) | 4,09<br>(4,13-5,10) | 3,70<br>(4,29-3,12) |

Nota: Para o método do pico da concentração, método de Chatwin e método da coroa de concentração são apresentados os resultados médios entre as curvas da primeira e a segunda seção de medição e entre parênteses os resultados para cada curva.

O método dos momentos resultou em valores elevados para  $D_L$  quando comparado com os demais métodos, tendo como premissa a conservação da massa do traçador e a hipótese da nuvem congelada. Apenas o ensaio E3 resultou em um valor inferior, cuja justificativa para essa diferença pode ser por conta do início da curva na primeira seção estar incompleta e o método dos momentos considera a área da curva de concentração.

Quando analisado os ensaios E5 e E6, apesar de terem sido realizados no mesmo dia, com vazão similar durante a passagem da pluma, os resultados obtidos foram diferentes, um potencial problema seria uma maior perda de massa no primeiro lançamento quando comparado com o segundo. Essa perda de massa pode ser resultado de zonas mortas em que modificam a velocidade do rio em alguns trechos e podem reter massa. Como é um rio pequeno esses efeitos ficam mais evidentes, podendo também ser a justificativa pelas oscilações na concentração próximo ao pico observados na segunda seção.

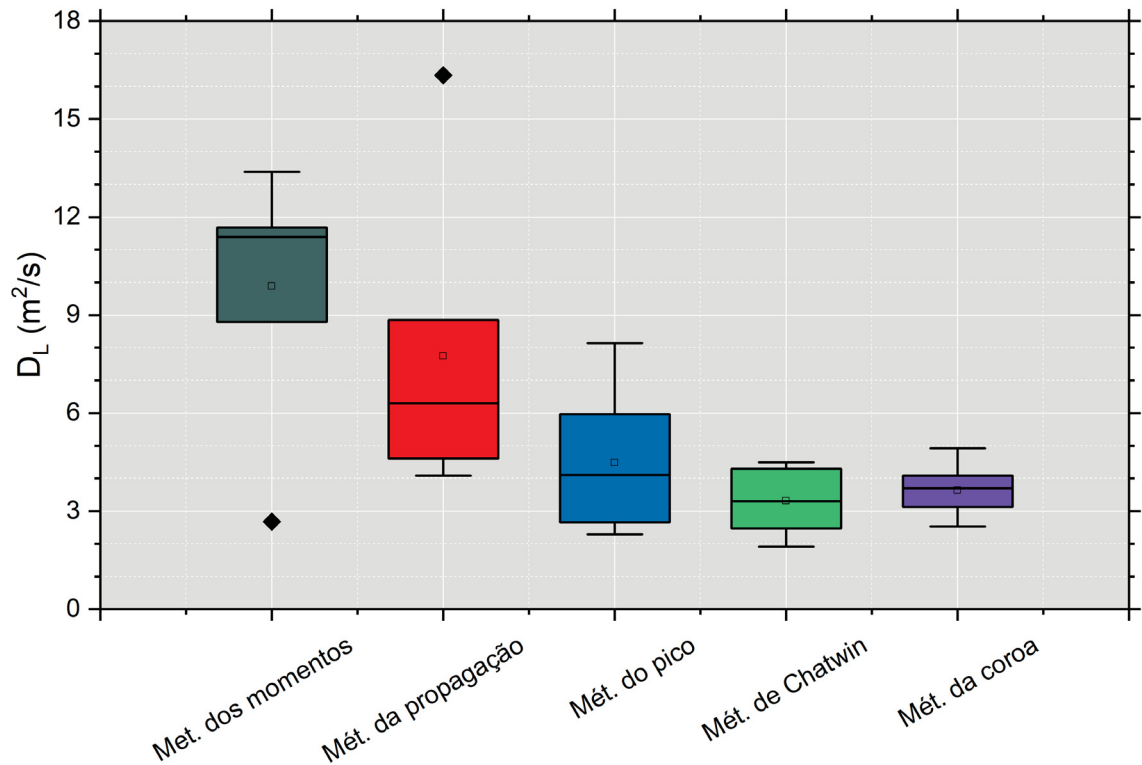


Figura 18 – Comparação dos valores de  $D_L$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) utilizando diferentes métodos experimentais.

Conforme apresentado por Barbosa Júnior et al. (2005a), Barbosa Júnior et al. (2005b) e Frasson (2013), o método dos momentos resulta valores superiores e o método de Chatwin valores inferiores para  $D_L$  quando comparado com os demais métodos, considerando o método da propagação como referência. Outra observação feita por Barbosa Júnior et al. (2005b), é que o método dos momentos e o da propagação utilizam duas seções de amostragem, os métodos mais simples, como o de Chatwin, o do pico e o da coroa da concentração consideram apenas uma seção, podendo simplificar o trabalho de campo.

Devens (2006) observou resultados similares, com o método dos momentos com resultados maiores, o método do pico da concentração próximo ao método da propagação e o método de Chatwin e o da coroa da concentração com valores inferiores. Em relação ao método de Chatwin, a segunda seção de amostragem apresentou valores mais próximos ao da propagação. Na análise, Devens (2006), considerou uma correção nos dados para que a perda do traçador não influencie nos resultados, por conta do traçador não ser absolutamente conservativo.

Pereira et al. (2016) realizaram experimentos com diferentes traçadores salinos e fluorescentes na bacia rio Paranaíba (Minas Gerais – Brasil), observando valores com menor discrepância entre o método da propagação com os métodos do pico da concentração e o da coroa da concentração.

O método de Chatwin e o método da coroa da concentração, por considerarem apenas a distribuição da concentração em uma seção, são menos sensível à conservação da massa do traçador. Os métodos do pico e da propagação, também dependentes da conservação da massa, se mostraram consistentes com o método de Chatwin e o da coroa da concentração. Apesar de ter apresentado resultados próximos ao método da propagação, o método dos picos é mais sensível a erros ocasionados por variações no pico e fortemente dependente de uma medição, conforme observado na seção P4 de monitoramento (Figura 17).

Nas seções seguintes serão apresentados com mais detalhes o método da propagação, método da coroa da concentração e o método de Chatwin.

### 3.2.1 Método da propagação

O método da propagação é o método mais utilizado para a determinação de  $D_L$  e apresenta a representação mais próxima da dispersão da pluma, ajustando o melhor valor conforme os dados de campo, minimizando erros obtidos pelas longas caudas das distribuições de concentração. Barbosa Júnior et al. (2005b), Devens (2006), Soares, Pinheiro e Zucco (2013), Frasson (2013), Oliveira (2013) e Pereira et al. (2016) consideram o método da propagação como referência quando comparado com os demais métodos.

A Figura 19 apresenta os perfis de concentração ao longo do tempo para o segundo local de amostragem, comparando o resultado medido em campo com o estimado utilizando o método da propagação, para cada ensaio realizado. A curva de concentração estimada para os ensaios 2, 5 e 7 apresentaram maior discrepância em relação os pontos medidos, quando comparada com a curva estimada para os ensaios 3, 4 e 6, podendo ser resultado da perda de massa entre as seções ou a incertezas na amostragem.

Para os ensaios realizados no dia 30/08/2022, E1 e E1.1, não foram possível estimar  $D_L$  utilizando o método da propagação, por conta do primeiro lançamento as curvas estarem incompletas e pelo segundo lançamento ter amostras só de uma seção de amostragem.

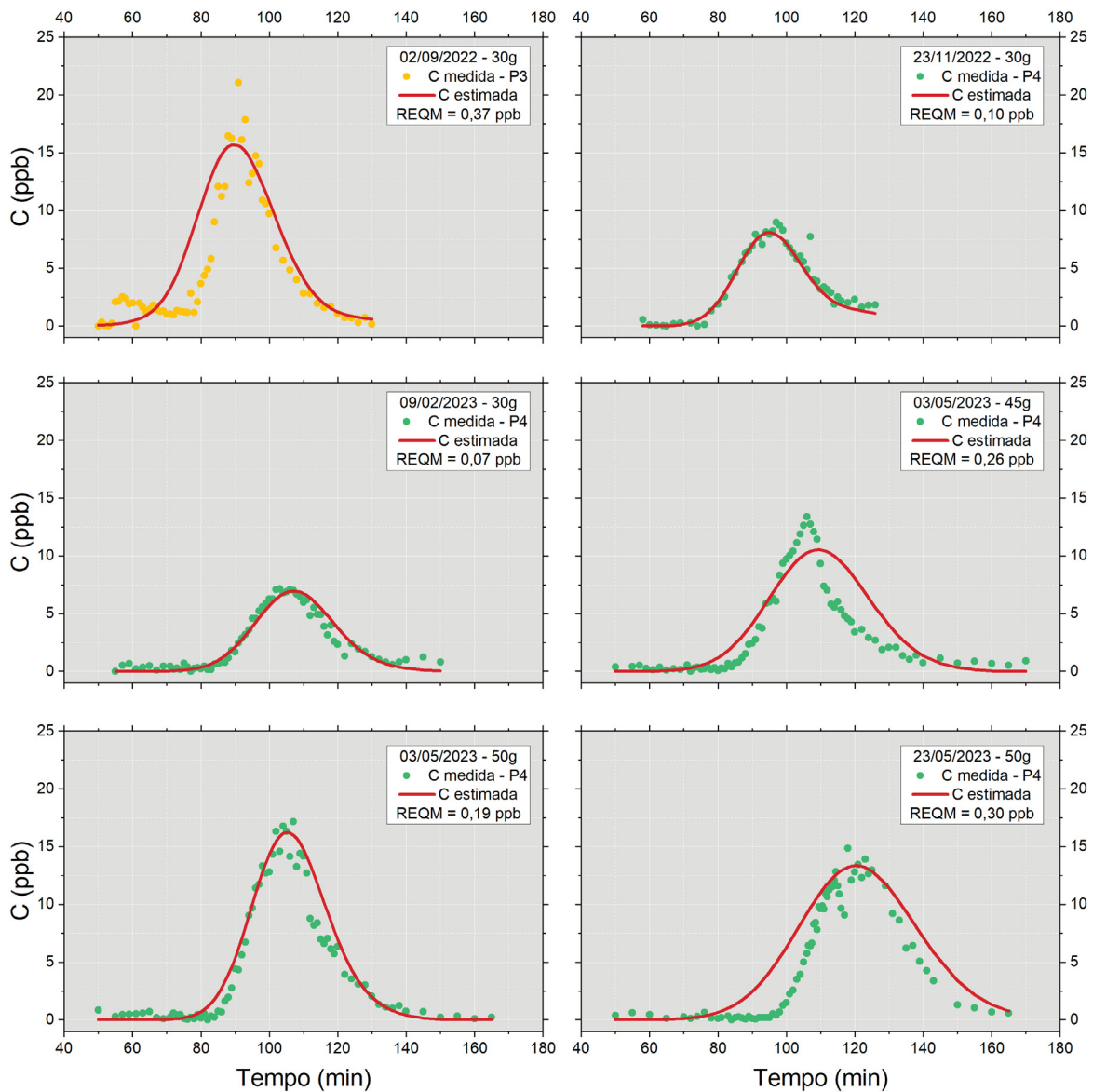


Figura 19 – Curva de concentração de Rodamina B excluindo o branco medido em campo na segunda seção de amostragem e a curva de concentração estimado utilizando o método da propagação, para cada ensaio realizado.

### 3.2.2 Método da coroa da concentração

O método da coroa da concentração considera o intervalo de tempo entre a mesma concentração observada antes e depois do pico. Essas concentrações são definidas arbitrariamente, podendo ser do início da passagem da pluma do traçador ou próxima ao pico de concentração, sendo necessária apenas uma seção de amostragem. Sendo assim, pode-se utilizar perfis de concentração incompletos, como o da seção P2 do dia 23/11/2022, ou ensaios com apenas uma seção de amostragem, como o ensaio E1.1.

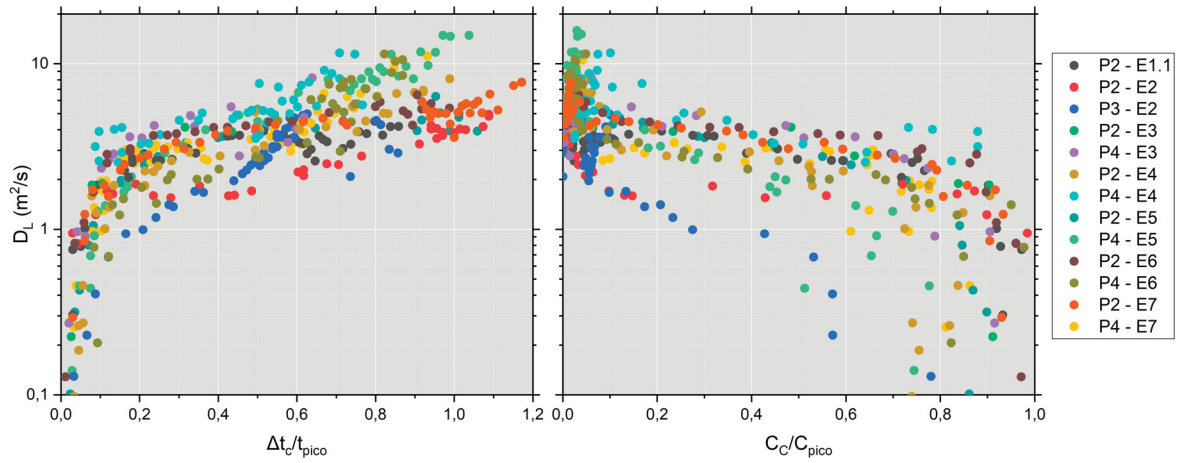


Figura 20 – Relação entre  $D_L$  (em escala log) com relação à variáveis normalizadas  $\Delta t/t_c$  e  $C_C/C_P$ , com o resultado obtido utilizando o método da coroa de concentração para cada seção de amostragem e experimento.

Para este trabalho foi aplicado o método da coroa de concentração considerando as concentrações antes do pico, e calculando o tempo em que ocorreria essa mesma concentração após o pico da concentração da pluma. A Figura 20 apresenta todos os valores estimados para  $D_L$  com diferentes intervalos de tempo ( $\Delta t$ ). Para cada ensaio, para melhor visualização foi normalizado pelo tempo em que ocorre o pico.

É possível observar na Figura 20 que, intervalos de tempo pequenos, ou seja, concentrações próximas a concentração do pico, resultam em  $D_L$  mais baixos e conforme aumenta o intervalo de tempo,  $D_L$  também aumenta, com uma tendência aparentemente assintótica. Ou seja, para o método da coroa foi calculado o  $D_L$  com todos os dados observados nas duas seções de medição, e foi considerado a mediana dos resultados para cada seção de amostragem em cada experimento, que está descrito em parênteses na Tabela 7.

O tempo da passagem da pluma pode variar com velocidade do rio e a distância do local do lançamento, sendo assim, é interessante observar a relação do resultado de  $D_L$  com  $\Delta t/t_c$  ou  $C_C/C_P$ , conforme apresentado na Figura 20. Apresentando uma faixa de valores mais uniforme considerando 0,25 a 0,75 para  $C_C/C_P$ . Corroborando a região intermediária observada pela relação de  $D_L$  e  $\Delta t$ .

Devens (2006) considerou apenas duas concentrações de referência para método da coroa da concentração, utilizando valores para  $C_c$  iguais a 50% e 75% de  $C_p$ , e com a média dos resultados determinou  $D_L$ . Encontrou valores inferiores ao comparado com os resultados utilizando o método da propagação, mas destacou a relevância do método por conta da simplificação do experimento, sendo necessário apenas dados de uma curva. A definição de  $C_c/C_p = 0,5$  e  $C_c/C_p = 0,75$  por Devens (2006) sugere ter sido arbitrária pois não apresentaram justificativa. No entanto, o critério parece coerente com as observações da Figura 20.

### 3.2.3 Método de Chatwin

As Figuras 21 a 26 apresentam as curvas de concentração para cada seção em cada ensaio, com a respectiva reta ajustada com o Método de Chatwin (Equação 2.43). Conforme apresentado na seção 2.2.5, a reta é ajustada com base nos valores de concentração no início da passagem da pluma até o pico de concentração da pluma. Por meio do coeficiente angular da reta produzida é calculado a velocidade do escoamento e pelo coeficiente linear o  $D_L$  (Tabelas 6 e 7).

O método de Chatwin permite a utilização de dados de apenas uma seção de amostragem para a estimativa de  $D_L$ , adicionalmente não necessita de todos os dados da curva de concentração ao longo do tempo, considerando, apenas, os dados do início da passagem da pluma até o momento da passagem da concentração máxima da pluma. O método apresentou resultados próximos ao método da propagação e o método do pico, mas a velocidade calculada foi maior que a medida.

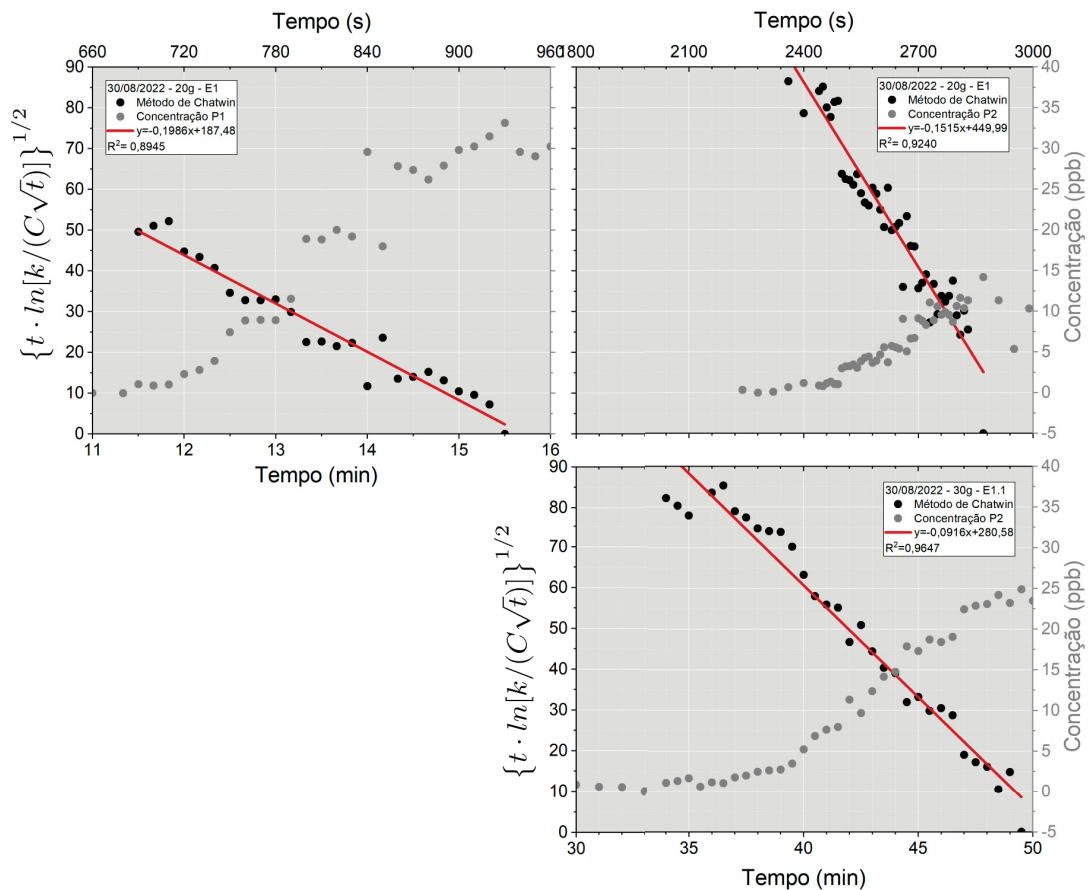


Figura 21 – Reta ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 30/08/2022, E1 e E1.1.

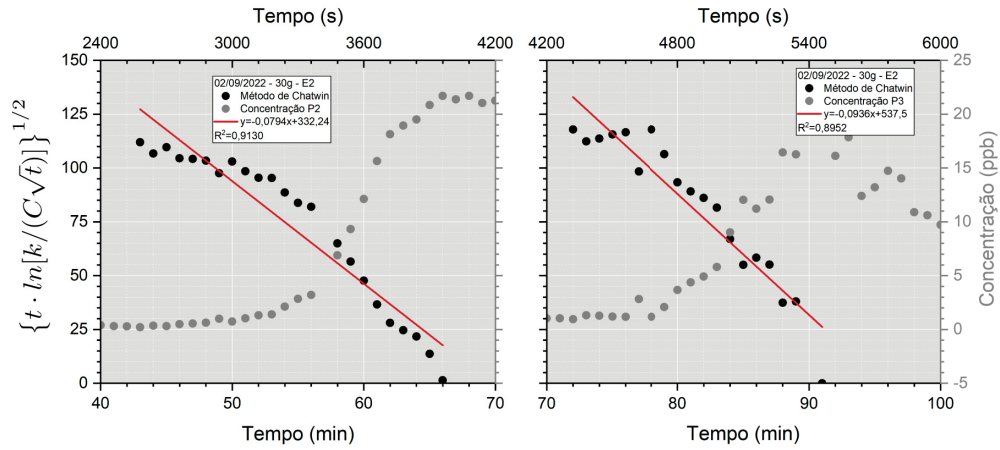


Figura 22 – Reta ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 02/09/2022, E2.

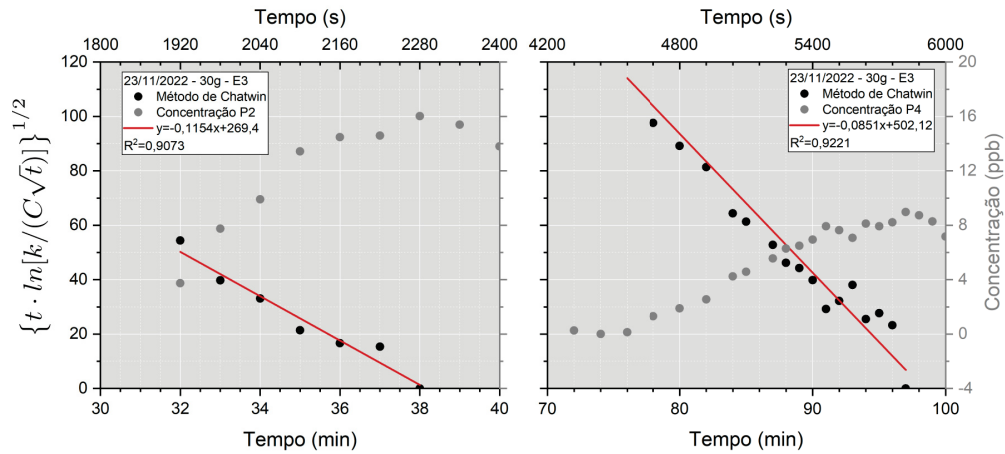


Figura 23 – Reta ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 23/11/2022, E3.

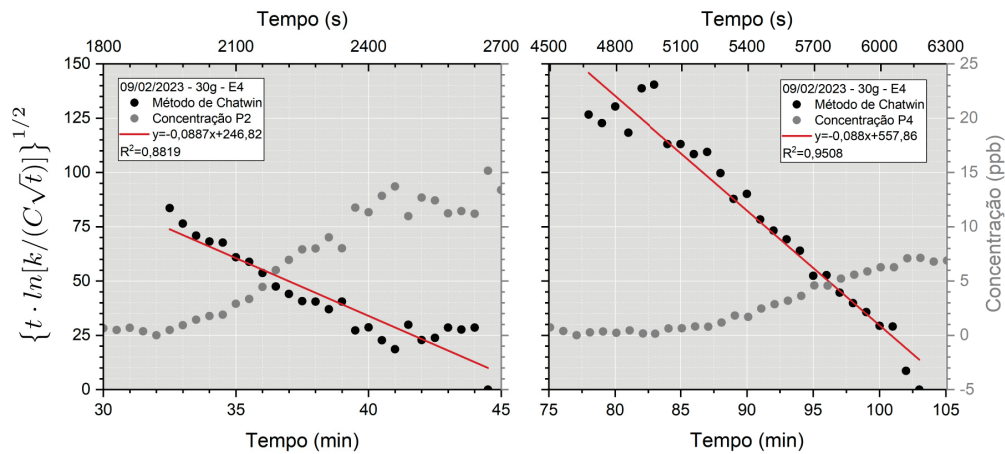


Figura 24 – Reta ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 09/02/2023, E4.

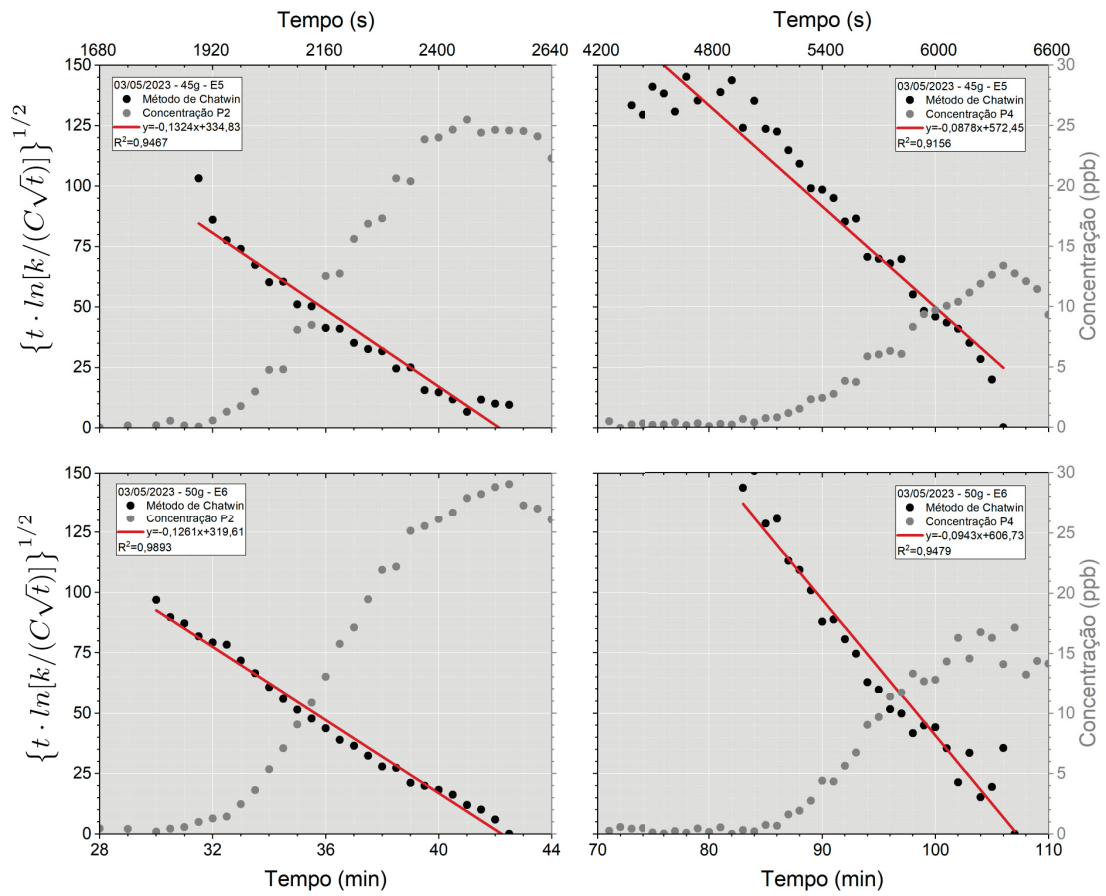


Figura 25 – Retra ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 03/05/2022, E5 e E6.

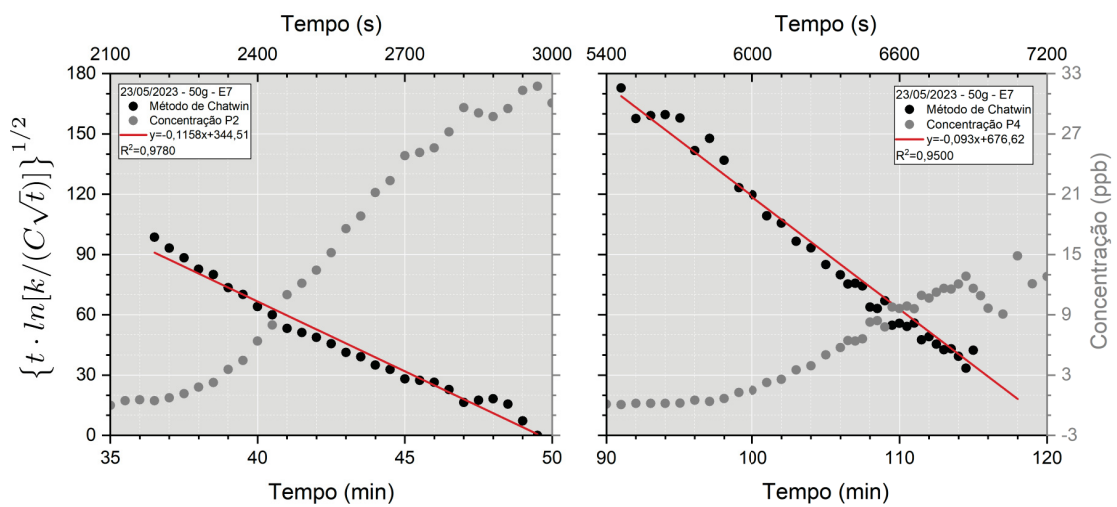


Figura 26 – Retra ajustada (Equação 2.43) e o dado original ( $C(t)$ ) para o dia 23/05/2022, E7.

O ajuste da reta minimiza o impacto das incertezas de medição da concentração na

estimativa de  $D_L$ . Frasson (2013) usou todos os dados da curva, provavelmente utilizou o módulo da Equação 2.43. Usando este trecho após o pico a análise se afasta ainda mais da hipótese da nuvem congelada. Isso foi observado pela mudança de declividade no segundo trecho da curva.

### 3.2.4 Métodos indiretos

Para comparação dos métodos diretos com os indiretos, foram escolhidas três equações dos autores Fischer et al. (1979), Deng, Singh e Bengtsson (2001) e Devens, Júnior e Silva (2010), apresentadas na Tabela 1. Para a aplicação das equações são necessárias informações sobre as características do rio no trecho, como velocidade média, profundidade média e largura do trecho da seção transversal, foram utilizados os dados medidos pelo ADV FlowTracker, nos ensaios 5, 6 e 7 (Tabela 5). A  $u_*$  foi calculada com base na declividade do rio Barigui obtida no Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba (SUDERHSA, 2002) ( $S = 0,00167\text{m/m}$ ).

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos pelos métodos indiretos. Pode-se observar que as equações propostas por Fischer et al. (1979) e Devens, Júnior e Silva (2010) apresentaram valores inferiores quando comparado com a equação de Deng, Singh e Bengtsson (2001) e os métodos experimentais (Tabela 7). Para os ensaios realizados nos dias 03/05/2023 (E5 e E6), os valores obtidos para  $D_L$  foram maiores do que o encontrado para o ensaio E7, sendo justificado pela diminuição da vazão no dia 23/03/2023.

Tabela 8 – Aplicação das equações de Fischer et al. (1979), Deng, Singh e Bengtsson (2001) e Devens, Júnior e Silva (2010) para o cálculo do  $D_L$ .

| Equação                                                                                               | Referência                     | Ensaio - $D_L$ (m <sup>2</sup> /s) |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------|-------|
|                                                                                                       |                                | E5                                 | E6    | E7    |
| $D_L = 0,011 \frac{U^2 B^2}{H u_*}$                                                                   | Fischer et al. (1979)          | 1,556                              | 1,613 | 0,449 |
| $D_L = \frac{0,15}{8\epsilon_{t0}} \left(\frac{B}{H}\right)^{5/3} \left(\frac{U}{u_*}\right)^2 H u_*$ | Deng, Singh e Bengtsson (2001) | 6,206                              | 6,463 | 2,215 |
| $D_L = 0,729 U^{0,774} B^{1,031} S^{0,036} H^{-0,151}$                                                | Devens, Júnior e Silva (2010)  | 2,307                              | 2,344 | 1,522 |

A equação elaborada por Devens, Júnior e Silva (2010) resultou em valores inferiores para  $D_L$  quando comparado com os métodos experimentais (Figura 27), mesmo atendendo a faixa recomendada de velocidade, profundidade e declividade. Frasson (2013) apresentou resultados similares, com a equação subestimando os valores de  $D_L$ . Soares, Pinheiro e Zucco (2013) observaram maior aderência aos valores obtido pela equação de Devens, Júnior e Silva (2010) com os dados experimentais.

Deng, Singh e Bengtsson (2001) utilizaram um conjunto de 73 dados para comparar a equação proposta, apresentando um menor erro em relação aos resultados medidos quando

comparado outras equações. Conforme obtido neste trabalho, a equação de Deng, Singh e Bengtsson (2001) apresenta resultados mais próximos aos métodos experimentais (Figura 27). Deng, Singh e Bengtsson (2001) destacam ainda que a equação pode ser melhorada ajustando uma equação mais precisa para a dispersão transversal ( $\epsilon_{t0}$ ) e a irregularidade do canal.

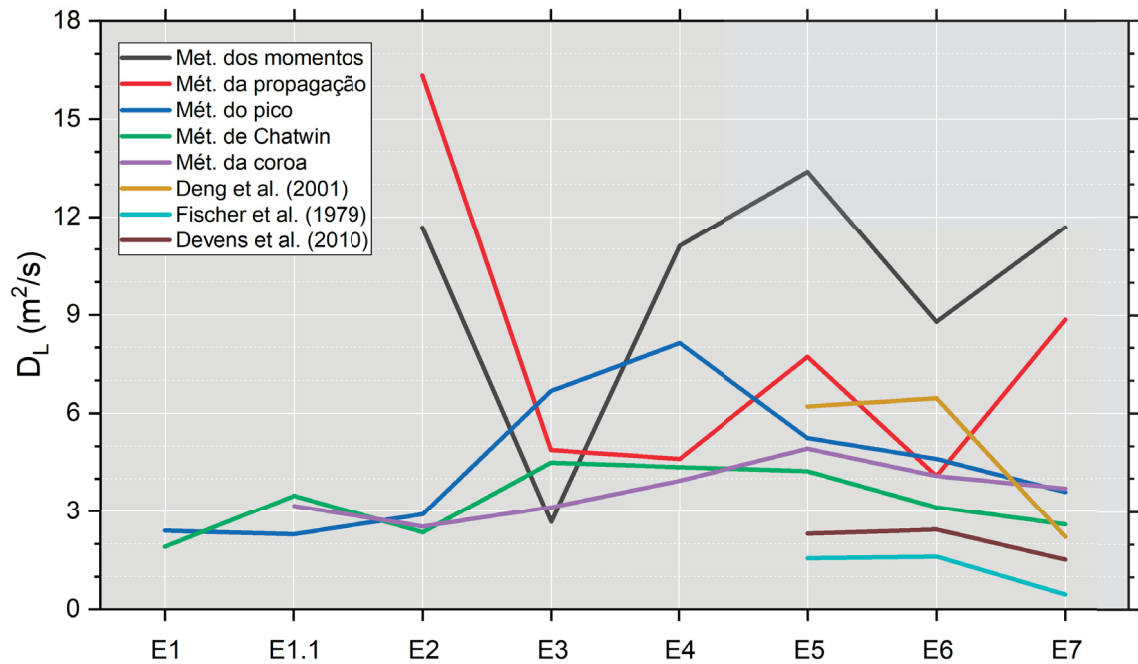


Figura 27 – Comparação dos resultados obtidos de  $D_L$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) utilizando os métodos indiretos e os diretos.

### 3.2.5 Correção dos dados

Conforme descrito anteriormente, quando analisado a conservação de massa da primeira seção de amostragem em relação a segunda, em todos os ensaios, observou-se uma diferença significativa que pode ter influencia nos resultados para a determinação de  $D_L$ . Esta diferença pode ser oriunda de erros de medição, zonas mortas, absorção por sedimentos no leito do rio ou ainda por conta de diluição pelo incremento de vazão ao longo do percurso do rio e entrada de efluentes.

Segundo apresentado por Rigo (1992), a área sobre a curva de concentração diminui ao longo das seções e como os métodos utilizam hipóteses que o escoamento é permanente e que ocorre a conservação da massa, é necessário realizar um ajuste nos dados que incorporam estes efeitos. A diminuição da área da curva ( $\int C dt$ ) pode ser decorrente da perda do traçador ou do aumento da vazão ao longo da bacia. Sendo assim, serão apresentadas duas correções feitas nos dados, com o objetivo de minimizar esses erros.

### 3.2.5.1 Correção pela área da bacia

Considerando que a vazão específica ( $q = Q/A$ ) ( $\text{m}^3/\text{s km}^2$ ) ao longo da bacia é constante, pode-se considerar que ao longo das seções terá um aumento da vazão por conta do aumento da área da bacia. Sendo assim, ao longo do trecho do rio a massa do traçador lançada é diluída pelo aumento da vazão ao longo do trecho, sendo necessário uma correção por um fator proporcional ao aumento da área de drenagem.

A partir dos modelos digitais de elevação (MDE) foram determinadas as áreas das bacias até os pontos de interesse, P0, P2 e P4, resultando nas áreas A0, A2 e A4 (Figura 28). Após a determinação das áreas, foi calculado um fator de correção  $A2/A0=1,010$  e  $A4/A2=1,075$  para cada seção, multiplicando pelo fator correspondente cada concentração medida nas seções P2 e P4. Com as concentrações corrigidas, foram aplicados os métodos experimentais novamente, produzindo todo um novo conjunto de resultados com o mesmo procedimento apresentado nas Seções 3.2.1 a 3.2.3. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 9 e 10 e detalhadas no Apêndice B.

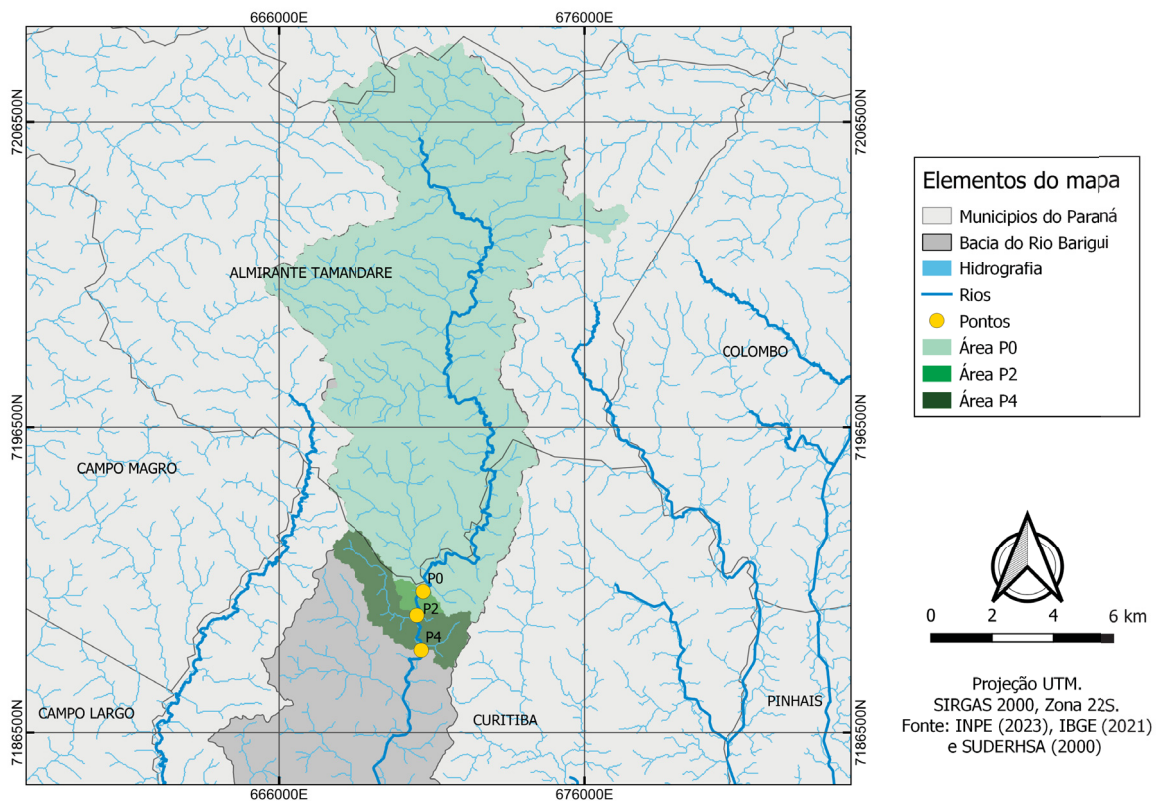


Figura 28 – Mapa com a representação das áreas da bacia até as seções P0, P2 e P4.

### 3.2.5.2 Correção pela massa

Outra correção elaborada se deu pela área da curva da concentração do traçador ao longo do tempo, considerando uma correção da massa "perdida" da primeira seção para a segunda seção de amostragem. Desta forma, foi calculado um fator de correção para cada dia do experimento com base na relação entre a área da curva da primeira seção com a segunda ( $\sum C_{P2}dt / \sum C_{P4}dt$ ) e corrigidos todos os dados da segunda seção de amostragem.

Foram obtidos fatores de correção de 0,97, 0,97, 1,22, 1,10 e 1,40 para os ensaios E3, E4, E5, E6 e E7, respectivamente. Com as concentrações para a segunda seção de amostragem corrigidas, foram aplicados os métodos experimentais para a determinação de  $D_L$ , cujos resultados estão descritos nas Tabelas 9 e 10 e no Apêndice C.

### 3.2.5.3 Comparação entre os resultados

As Tabelas 9 e 10 apresentam a comparação dos resultados nos ensaios E3, E4, E5, E6 e E7, com e sem a aplicação das correções nos dados descritas nas Seções 3.2.5.1 e 3.2.5.2.

Tabela 9 – Comparação dos resultados dos parâmetros obtidos em cada ensaios com e sem correção dos dados.

| Propriedade                                        | Dados               | Ensaio |      |      |      |      |
|----------------------------------------------------|---------------------|--------|------|------|------|------|
|                                                    |                     | E3     | E4   | E5   | E6   | E7   |
| Vazão (m <sup>3</sup> /s)<br>(Método dos momentos) | Sem correção        | 2,26   | 2,44 | 2,17 | 1,96 | 1,70 |
|                                                    | Correção pela área  | 2,17   | 2,34 | 2,07 | 1,88 | 1,63 |
|                                                    | Correção pela massa | 2,29   | 2,47 | 1,95 | 1,87 | 1,42 |
| Velocidade (m/s)<br>(Método dos momentos)          | Sem correção        | 0,38   | 0,33 | 0,32 | 0,34 | 0,30 |
|                                                    | Correção pela área  | 0,38   | 0,33 | 0,32 | 0,34 | 0,30 |
|                                                    | Correção pela massa | 0,38   | 0,33 | 0,32 | 0,34 | 0,30 |
| Velocidade (m/s)<br>(Método de Chatwin)            | Sem correção        | 0,42   | 0,37 | 0,38 | 0,38 | 0,33 |
|                                                    | Correção pela área  | 0,42   | 0,37 | 0,38 | 0,38 | 0,33 |
|                                                    | Correção pela massa | 0,42   | 0,37 | 0,38 | 0,38 | 0,33 |

O primeiro ponto a ser observado é que apenas nos métodos da propagação e do pico ocasionaram em diferenças para  $D_L$ , que é o esperado conforme as deduções realizadas para a elaboração dos métodos. Sendo destacado também pelos autores Devens (2006), Frasson (2013) e Oliveira (2013), o método dos momentos, método gráfico de Chatwin e o da coroa, não são afetados pela perda de massa do traçador ao longo do rio, sendo métodos mais robustos sob este aspecto.

Em relação aos parâmetros, como velocidade e vazão, apenas a vazão sofreu alteração, por conta do cálculo considerar a área da curva de concentração ao longo do tempo, que foi alterada por conta dos fatores de correção. Apresentando uma redução, com a correção

da massa sendo a menor vazão na proporção do fator de correção, se aproximando mais do que foi medido em campo com o molinete.

Tabela 10 – Comparação dos resultados obtidos para  $D_L$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) em cada ensaios com e sem correção dos dados.

| Método                          | Dados               | $D_L$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) - Ensaios |       |       |      |       |
|---------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|-------|-------|------|-------|
|                                 |                     | E3                                        | E4    | E5    | E6   | E7    |
| Método dos momentos             | Sem correção        | 2,68                                      | 11,11 | 13,38 | 8,79 | 11,68 |
|                                 | Correção pela área  | 2,68                                      | 11,10 | 13,39 | 8,79 | 11,68 |
|                                 | Correção pela massa | 2,68                                      | 11,10 | 13,38 | 8,79 | 11,68 |
| Método da propagação            | Sem correção        | 4,88                                      | 4,61  | 7,72  | 4,09 | 8,95  |
|                                 | Correção pela área  | 4,30                                      | 3,69  | 6,61  | 3,43 | 7,34  |
|                                 | Correção pela massa | 5,18                                      | 4,94  | 4,57  | 3,12 | 3,37  |
| Método do pico de concentração  | Sem correção        | 6,68                                      | 8,14  | 5,25  | 4,61 | 3,60  |
|                                 | Correção pela área  | 6,10                                      | 7,35  | 4,40  | 4,22 | 3,25  |
|                                 | Correção pela massa | 6,92                                      | 8,45  | 4,18  | 4,03 | 2,92  |
| Método gráfico de Chatwin       | Sem correção        | 4,49                                      | 4,36  | 4,23  | 3,13 | 2,59  |
|                                 | Correção pela área  | 4,49                                      | 4,36  | 4,23  | 3,13 | 2,59  |
|                                 | Correção pela massa | 4,49                                      | 4,36  | 4,23  | 3,13 | 2,59  |
| Método da coroa de concentração | Sem correção        | 3,13                                      | 3,84  | 4,92  | 4,09 | 3,70  |
|                                 | Correção pela área  | 2,63                                      | 3,85  | 4,92  | 4,09 | 3,70  |
|                                 | Correção pela massa | 2,63                                      | 3,85  | 4,92  | 4,09 | 3,70  |

Nota: Para o método do pico e o de Chatwin são apresentados os valores médios entre as seções de medição e para o método da coroa são apresentados as medianas dos resultados entre as seções de medição.

Para a melhor visualização da comparação dos resultados de  $D_L$  obtidos utilizando os métodos da propagação e da concentração de pico, os resultados foram apresentados na Figura 29. Quando considerado a correção pela área da bacia, os dados resultaram em valores menores para  $D_L$  com ambos os métodos.

Entretanto, quando corrigido pela massa, os ensaios E3 e E4 resultaram em valores maiores, isso se deve por conta do aumento de 3% na massa entre a primeira e segunda seção. Como apontado anteriormente, deve ser oriundo de incertezas em todo o processo experimental e de integração, pelo esperado ser a diminuição e não o aumento da massa ao longo do trecho. Os demais dias se comportaram como o esperado, com  $D_L$  sendo menor quando comparado com os dados sem correção e com a correção da área.

A Tabela 11 apresenta a comparação da raiz do erro quadrático médio (REQM) obtido pelo método da propagação para os ensaios, com os dados com e sem correção. Pode-se observar que em sua maioria houve uma diminuição do REQM nos resultados após ambas as correções propostas, melhorando a estimativa de  $D_L$  após a correção dos dados.

Considerando a REQM, a correção dos dados pela área resultou na melhor aproximação de  $D_L$  utilizando o método da propagação.

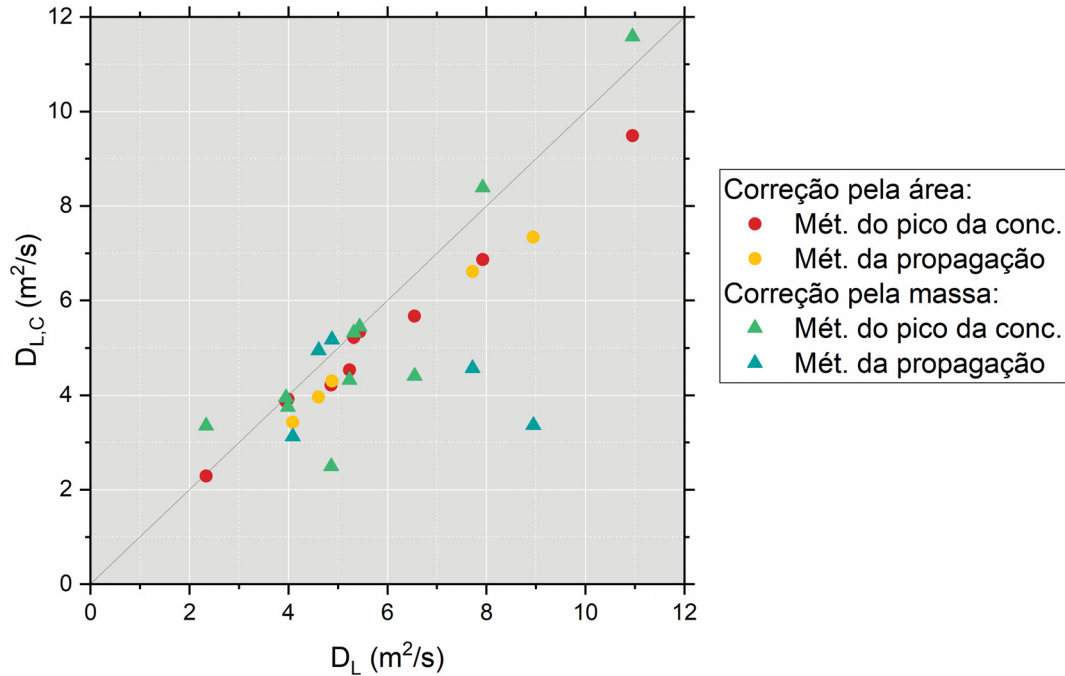


Figura 29 – Gráfico com a comparação dos resultados obtidos utilizando o método da propagação e do pico da concentração, com e sem correção dos dados.

Tabela 11 – Raiz do erro quadrático médio (ppb) obtido no método da propagação, para cada ensaio, com e sem a correção dos dados.

| Dados               | Ensaio - REQM (ppb) |      |      |      |      |
|---------------------|---------------------|------|------|------|------|
|                     | E3                  | E4   | E5   | E6   | E7   |
| Sem correção        | 0,10                | 0,07 | 0,26 | 0,19 | 0,30 |
| Correção pela área  | 0,12                | 0,07 | 0,23 | 0,15 | 0,25 |
| Correção pela massa | 0,09                | 0,07 | 0,23 | 0,14 | 0,15 |

### 3.3 Conclusões

O experimento para a determinação do DL consiste no lançamento de um traçador no rio de estudo com massa pré-definida. Esta quantidade a ser despejada é dependente do próprio fenômeno a ser avaliado (dispersão longitudinal) e do intervalo de detecção dos equipamentos de análise da concentração. Desta forma, propõe-se uma análise para definir um intervalo de massa de traçador lançada, buscando maximizar a efetividade do experimento, evitando o desperdício de material, e produzindo curvas de concentração ao

longo do tempo compreendidas na faixa de detecção ótima do equipamento. Tal estratégia se mostrou efetiva e adequada, sendo recomendada para outros estudos.

Os resultados obtidos apresentaram consistência com a dispersão em canais, com perfis de concentração ao longo do tempo para cada trecho bem definidos, apresentando oscilações apenas no pico da concentração no ponto mais distante do lançamento do traçador, podendo ser resultante de zonas de estagnação. Estas características, apesar de comuns em canais naturais, merecem investigação futura. Os ensaios apresentaram perda de massa entre as seções de amostragem, que podem ser resultado da retenção da massa do traçador no leito e nas margens do rio, incertezas ou amostragem incompleta da pluma.

Para os ensaios realizados nos dias 03/05/2023 e 23/05/2023 o fator de perda de massa variou entre 0,72 a 0,91. Tal fato, apesar de indesejado, é reportado na literatura variando de 0,55 a 0,96 (DUARTE et al., 1999; SOARES; PINHEIRO; ZUCCO, 2013; ATKINSON; DAVIS, 2000; DAVIS; ATKINSON; WIGLEY, 2000; DAVIS; ATKINSON, 2000) e pode ser corrigido a posteriori.

O método dos momentos resultou em valores consistentes de velocidade quando comparado à medição de vazão e da seção transversal, mas pelo método considerar a conservação de massa resultou em vazão e  $D_L$  elevados, com valor médio de 9,89 m<sup>2</sup>/s. O método da propagação, método de Chatwin, o método do pico da concentração e o método da coroa da concentração apresentaram valores similares para  $D_L$ , com valor médio de 4,83 m<sup>2</sup>/s, com desvio padrão de 2,95 m<sup>2</sup>/s.

Quando corrigidos os dados considerando a não conservação da massa, os métodos da propagação e o do pico da concentração apresentaram  $D_L$  menores do que com os dados sem correção. Com exceção dos ensaios E3 e E4, que apresentaram uma diferença entre as curvas de 3% a mais na segunda seção, que são oriundos de erros na medição, pela massa do traçador diminuir ao longo do rio.

De acordo com o encontrado na literatura, o método da propagação foi o que se ajustou aos dados dos experimentos realizados no Rio Barigui, por ajustar o  $D_L$  de acordo com os dados da segunda curva, minimizando o erro. Após a aplicação da correção da massa do traçador, apresentou para  $D_L$  o valor médio de 4,24 m<sup>2</sup>/s.

Quando comparado com as equações parametrizadas, a equação proposta por Deng, Singh e Bengtsson (2001) resultou em valores mais próximos ao dos métodos experimentais, com as equações de Fischer et al. (1979) e Devens, Júnior e Silva (2010) subestimando o  $D_L$ . Deng, Singh e Bengtsson (2001) apontam que caso ajustado uma equação para a difusão turbulenta transversal e considerando a irregularidade do canal, pode-se diminuir as incertezas do método.

## 4 Determinação do coeficiente de reaeração em rios pelo método Delta

### 4.1 Material e Métodos

O local de estudo, onde foi aplicado o método Delta Aproximado, foi uma sessão do rio Passaúna, a montante do reservatório do Passaúna, localizado na Região Metropolitana de Curitiba-PR (Figura 30). O rio Passaúna está localizado entre os municípios de Almirante Tamandaré, Campo Magro, Campo Largo, Curitiba e Araucária, fazendo parte da bacia Alto Iguaçu e da sub bacia Passaúna, com localização entre os paralelos 25°26'– 25°32'S e os meridianos 49°23'– 49°21'O, com 22,27 km de extensão e diferença de nível de 40,5 m (CURITIBA, 2012). O rio é a principal tributário do reservatório Passaúna que abastece cerca de 20% da Região Metropolitana de Curitiba, abrange uma extensão territorial de cerca de 214 km<sup>2</sup> e possui vazão média de 1,2 m<sup>3</sup>/s (SANEPAR, 2013; DIAS, 1997).

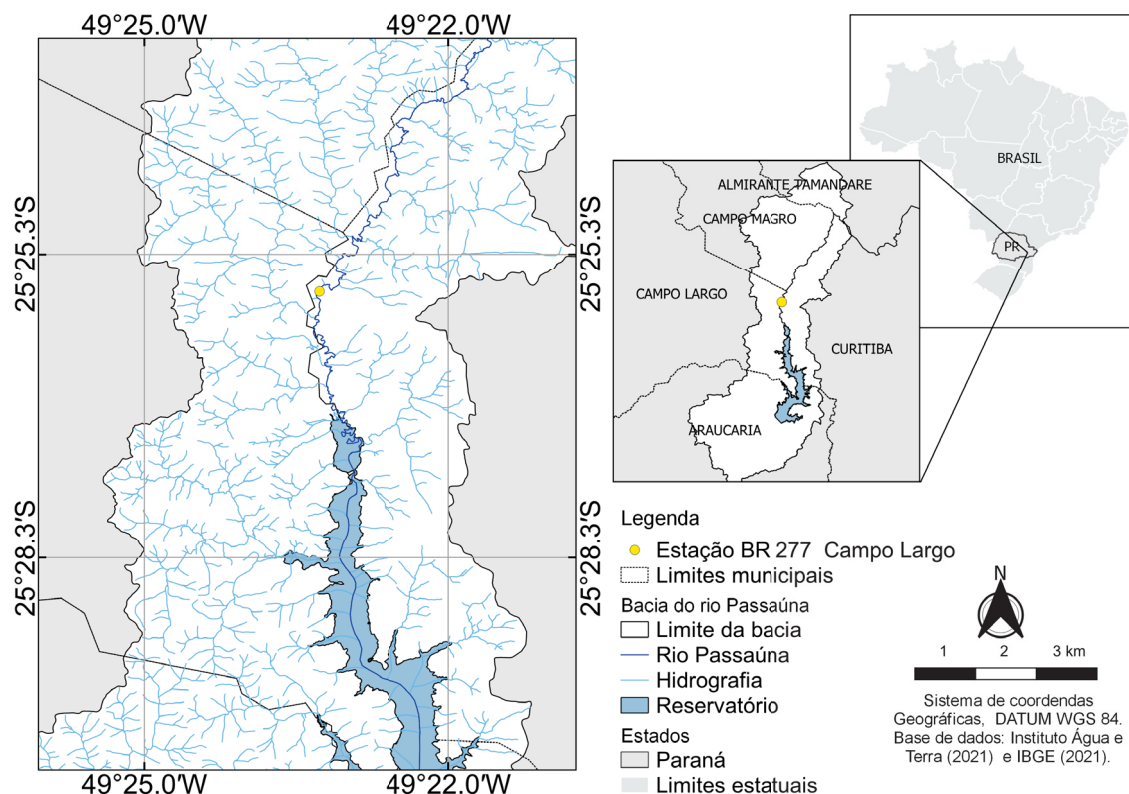


Figura 30 – Localização do reservatório de Passaúna com a hidrografia e a estação BR 277 – Campo Largo.

Para a determinação de  $K_a$  utilizando as equações apresentadas na Tabela 3, são necessárias informações de vazão, profundidade média e área da seção transversal. A

seção utilizada para os cálculos é a estação BR 277 – Campo Largo, com código 65021800, localizada embaixo de uma ponte, com coordenadas 25°25'38"S e 49°23'17"O, onde também são medidos os dados de OD. A estação apresenta dados hidrológicos do rio Passaúna desde 1984, mas para os últimos anos a série histórica apresenta algumas falhas. Por conta disso foi utilizado apenas a curva chave para o período de 19/06/2016 a 31/12/2020, disponível no site da Agência Nacional de Águas (ANA) (2021) (Figura 31).

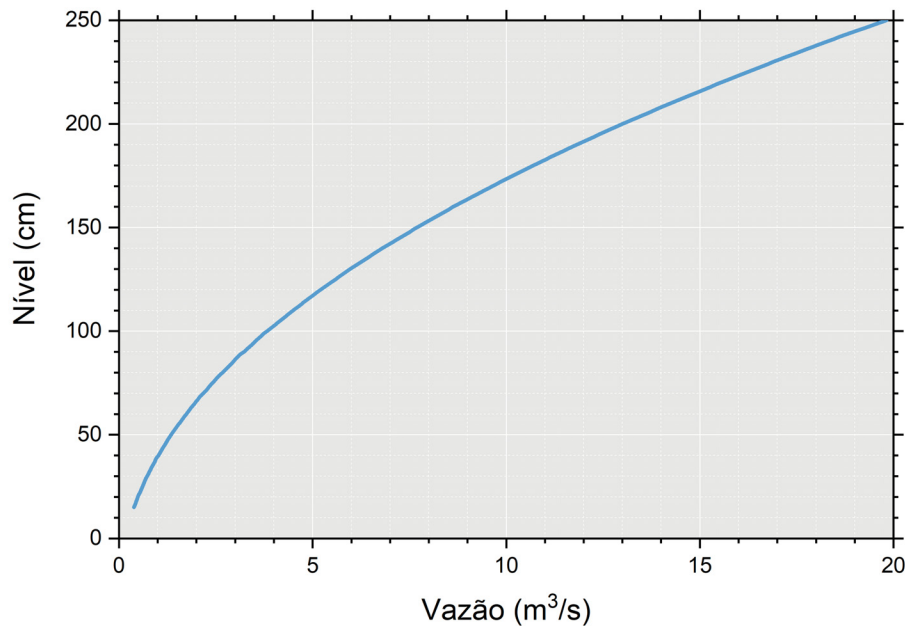


Figura 31 – Curva-chave do Rio Passaúna na seção BR 277. Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA) (2021).

Para este trabalho são utilizados dados modelados (calibrados) da vazão do rio Passaúna pelo modelo LARSIM entre o período de 01/03/2018 a 30/04/2020 na seção da Estação BR 277 – Campo Largo, com código 65021800, por apresentar uma série de dados completa para o período de interesse (Figura 32). A série de dados foi desenvolvida pelo projeto MuDak-WRM (2019) (Multidisciplinary Data Acquisition as Key for a Globally Applicable Water Resource Management; <<https://www.mudak-wrm.kit.edu/>>) que é uma parceria entre universidades e empresas do Brasil e da Alemanha para estudar alternativas de como otimizar a gestão de recursos hídricos, e tem como área de estudo o reservatório Passaúna.

A área da seção transversal do rio Passaúna na seção da estação BR 277 – Campo Largo para o dia 21 de março de 2018 está representada na Figura 33. As medições da largura e profundidade foram feitas com ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) SONTEK FlowTracker, conforme apresentado por Colombo (2019). A partir do perfil transversal e dos níveis diários, é possível estimar a variação da área da seção transversal diária.

Para a determinação do perfil do oxigênio dissolvido foram utilizados os dados obtidos pelo projeto MuDak-WRM (2019) que utilizaram o sensor óptico de OD miniDOT® Logger,

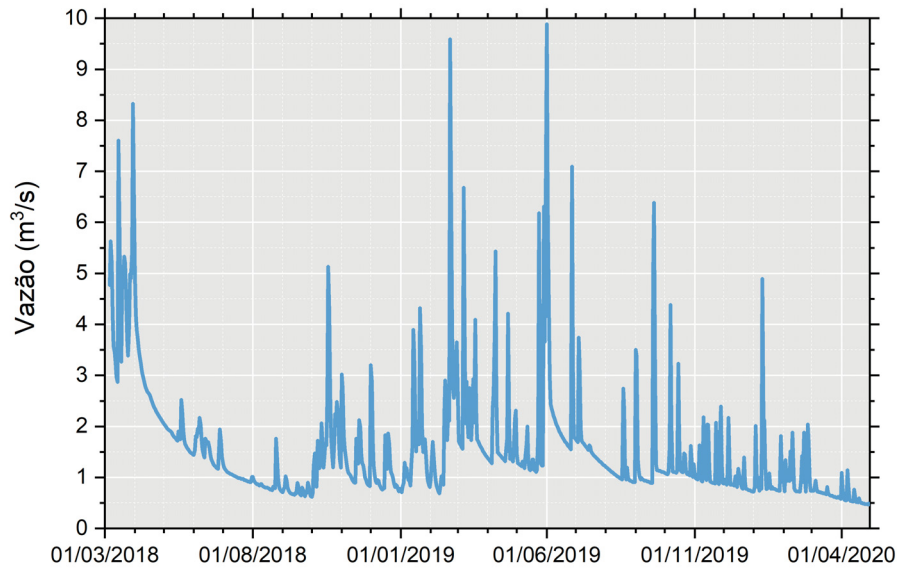


Figura 32 – Hidrograma da vazão média diária ao longo do período 01/03/2018 a 30/04/2020 na seção da Estação BR 277 – Campo Largo.

com faixa de medição de 0 a 150% da saturação de  $C_{OD}$  com uma precisão de  $\pm 10 \mu\text{mol/L}$  (PME, 2021). O sensor foi instalado numa seção do rio Passaúna no período de março de 2018 a dezembro de 2020. A seção de medição está localizada a montante do reservatório Passaúna, nas coordenadas  $25^{\circ}25'S$  e  $49^{\circ}23'O$  com altitude de 934 metros, a cerca de 1,3 km de distância ao longo do rio da estação BR 277. O local de instalação do sensor apresenta menor influência humana quando comparado com o local da estação BR 277, com cobertura vegetal maior, seção transversal mais estreita e com menor profundidade média. O sensor fornece um arquivo .txt com os valores da temperatura da água, da concentração de oxigênio dissolvido ( $C_{OD}$ ) e da concentração de saturação de oxigênio dissolvido ( $C_{ODsat}$ ), medidos a cada 5 minutos, no período de março de 2018 a setembro de 2018, e a cada 10 minutos, no período de outubro de 2018 a dezembro de 2020 (Figura 34).

Por meio do perfil diário de OD da série temporal, foi possível estimar, para cada dia, um valor médio para o coeficiente de reaeração utilizando o modelo Delta Aproximado, descrito na Equação 2.67. Com  $\phi$  representando a diferença entre o tempo que ocorreu o máximo da concentração de OD ( $t_{max}$ ) e o meio dia solar ( $t_f$ ) para cada dia. Para o período de novembro de 2018 a fevereiro de 2019 estava em vigor o horário de verão no Brasil, mas para os cálculos será considerado o horário solar real.

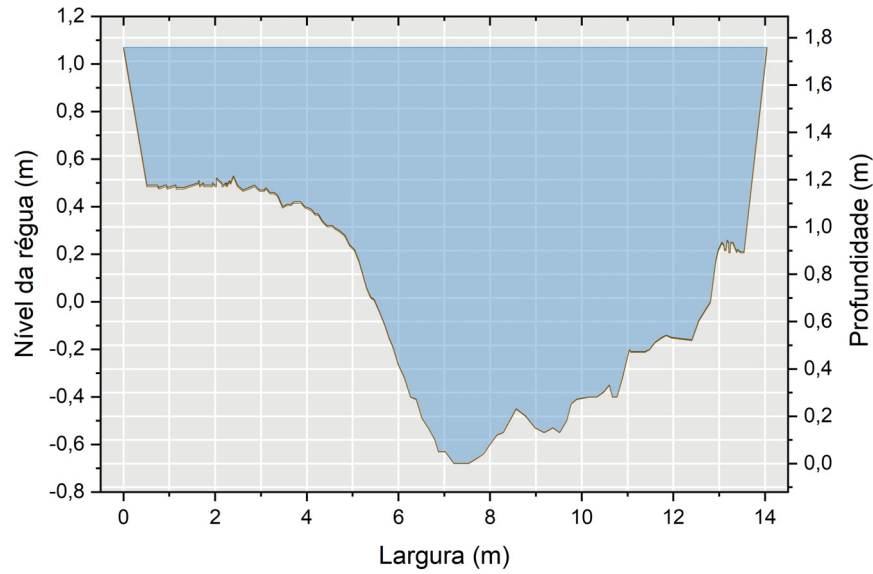


Figura 33 – Seção transversal rio Passaúna, para o dia 21/03/2018 com cota de 1,07 metros. Fonte: Colombo (2019).

#### 4.1.1 Determinação do fotoperíodo ( $f$ )

Por conta do eixo e da rotação da Terra, o fotoperíodo varia ao longo dos dias. Para poder estimar a hora de acordo com o ângulo do Sol com o horizonte é necessário utilizar equações que levam em conta a órbita da Terra, as coordenadas da área de interesse e também o dia em questão. Para este trabalho foram utilizadas as equações apresentadas por Stull et al. (2015) para estimar os horários de nascer e pôr do Sol, e por fim determinar o meio dia solar.

A hora do dia aproximada ( $t_{UTC}$ ), considerando o relógio solar, pode ser calculada pela equação

$$t_{UTC} = \frac{t_d}{C} \left\{ -\lambda_e \pm \arccos \left[ \frac{\sin \Phi \cdot \sin \delta_s - \sin \Psi}{\cos \Phi \cdot \cos \delta_s} \right] \right\}, \quad (4.1)$$

que  $t_d$  e  $C$  são correções da equação, com valores iguais a 24 horas e  $2\pi$  radianos respectivamente,  $\lambda_e$  é a longitude,  $\Phi$  a latitude,  $\Psi$  o ângulo de elevação local do sol acima do horizonte e  $\delta_s$  o ângulo de declinação solar.

Para este trabalho foi calculado a hora do nascer e do pôr do Sol; em ambos os casos o ângulo de elevação local do sol em relação ao horizonte foi considerado nulo ( $\Psi = 0$ ). Outro parâmetro importante nesta equação é o sinal, para o amanhecer é considerado o sinal positivo e para o pôr do sol o sinal negativo. Após o cálculo dos horários é possível determinar o fotoperíodo para cada dia e assim o meio dia solar.

O ângulo da declinação solar pode ser aproximado por

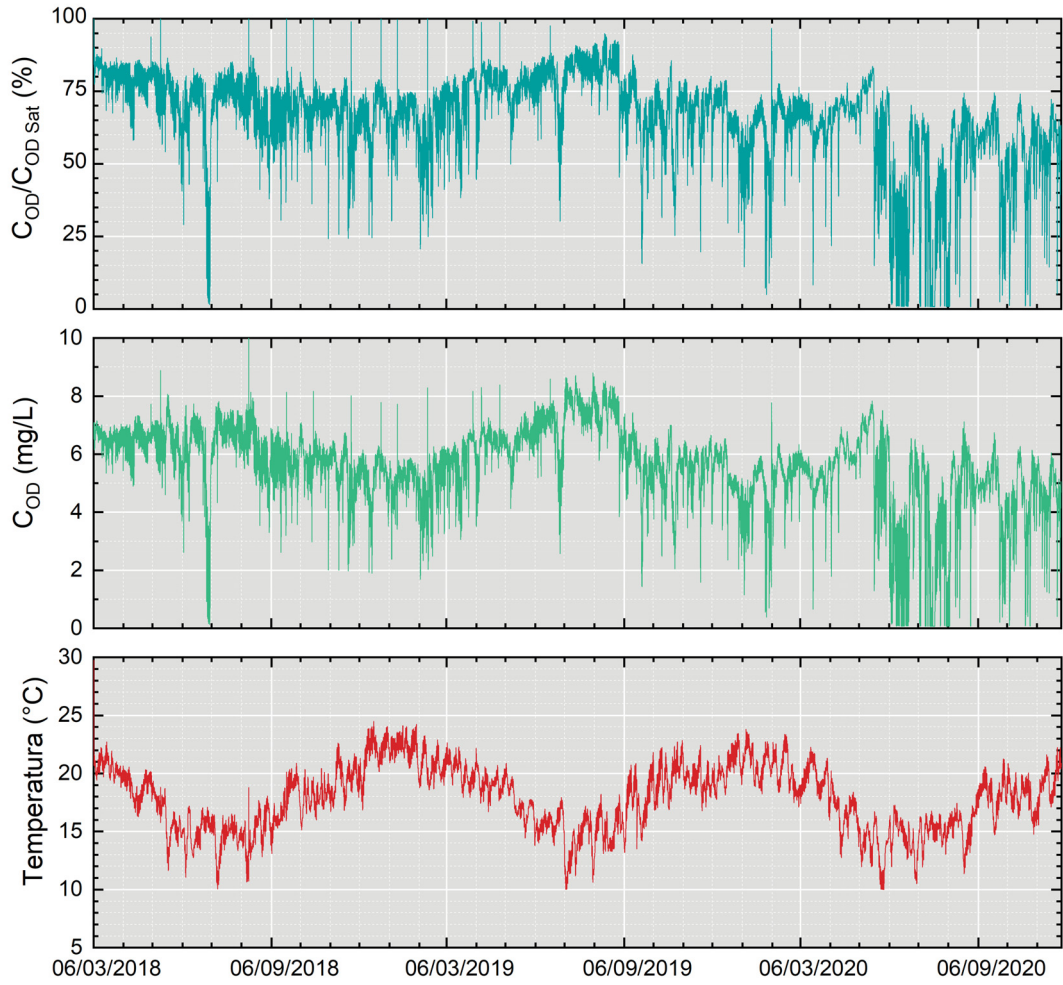


Figura 34 – Série de dados de temperatura da água (°C), concentração de OD (mg/L) e porcentagem da  $C_{OD}$  em relação a  $C_{ODsat}$  (%).

$$\delta_s \approx \Phi_r \cdot \cos \left[ \frac{c(d - d_r)}{d_y} \right], \quad (4.2)$$

com  $d$  sendo o dia Juliano do evento em análise,  $d_r$  é o dia Juliano do solstício de inverno (para o Hemisfério sul),  $d_y$  é o número de dias do ano (365 ou 366 dias) e  $\Phi_r$  é definido como a latitude do Trópico de Capricórnio ( $\Phi_r = 23,44^\circ$ ).

Para corrigir o tempo por conta da órbita elíptica inclinada da Terra, é utilizada a Equação de Tempo aproximada dada por

$$\Delta t_a \approx -a \cdot \text{sen}(m) + b \cdot \text{sen}(2m + c), \quad (4.3)$$

em que  $a = 7,659$  minutos,  $b = 9,863$  minutos,  $c = 3,588$  radianos e  $m$  representando a anomalia média, que é o ângulo entre o periélio e a localização da Terra, que varia durante o ano. A anomalia média pode ser aproximada por

$$m = c \cdot \frac{d - d_p}{P}, \quad (4.4)$$

com  $P$  sendo o período orbital ( $P = 365,256363$  dias).

Com os resultados obtidos pelas equações 4.1 e 4.3 é possível calcular a hora do dia aproximada pela anomalia média ( $t_{eUTC}$ ) como

$$t_{eUTC} = t_{UTC} - \Delta t_a. \quad (4.5)$$

O horário fornecido pela 4.5 é em relação ao relógio solar, precisa ser corrigido pelo fuso horário do local.

## 4.2 Resultados e discussões

A Figura 35 apresenta exemplos de perfis de OD em diferentes dias, em que a curva se comporta com base no domínio dos processos e premissas considerados no modelo. Observa-se que a concentração aumenta ao longo do dia e atinge o seu máximo no período da tarde, variando em geral pela amplitude da curva. Em todos os casos apresentados da Figura 35 foi possível calcular  $K_a$  e os valores obtidos estão na faixa 5 a 20  $d^{-1}$ .

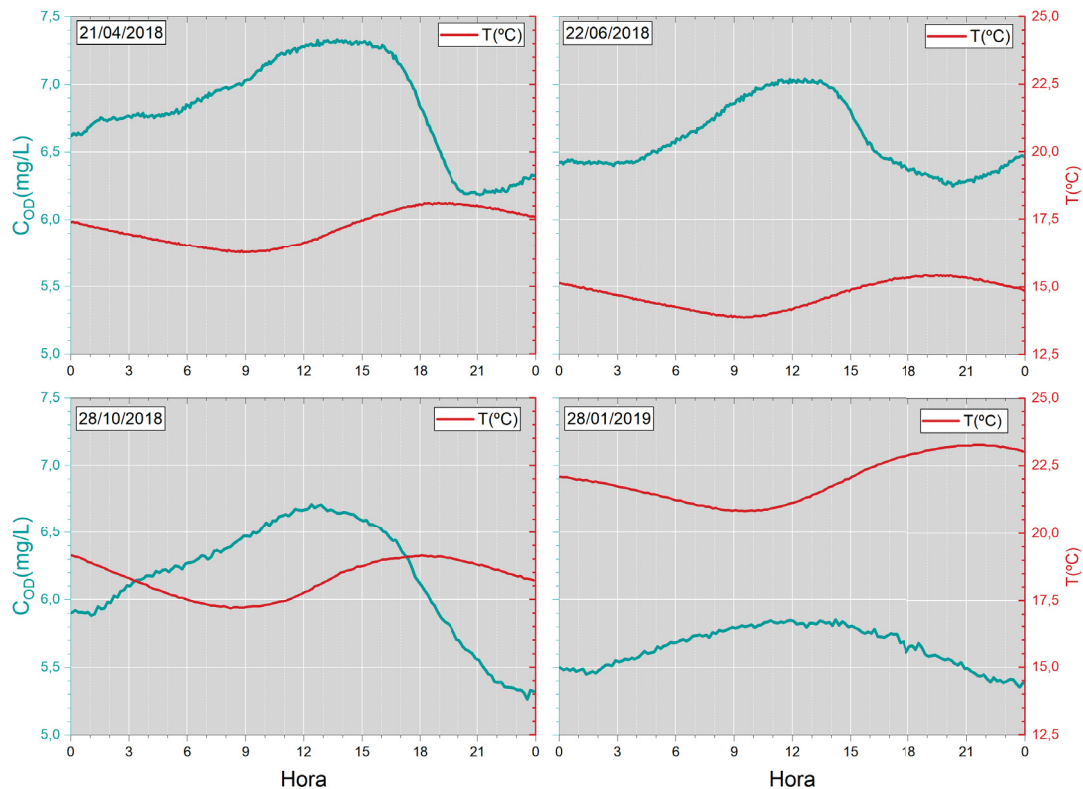


Figura 35 – Perfis diários de OD que desenvolveram característica senoidal conforme preconizado pelo modelo do método delta aproximado (MCBRIDE; CHAPRA, 2005), resultando em  $K_{a,20}$  dentro da faixa de 5 a 20  $d^{-1}$ .

O período em que os dados de oxigênio dissolvido foram obtidos, no rio Passaúna, resultou em valores para o coeficiente de reaeração entre 0,09 a 1150  $\text{d}^{-1}$ , utilizando o método delta aproximado e considerando a variação do fotoperíodo. Com cerca de 52% dos dias não sendo aplicável o método e, dentre os dias que foram calculados  $K_a$ , 78% dos dias resultaram em  $K_a$  na faixa de 1 a 30  $\text{d}^{-1}$ .

Houve dias em que, mesmo seguindo o perfil de OD proposto no modelo, o método não foi aplicável, e dias em que o perfil apresentou variações como picos incomuns, não seguindo o modelo proposto e resultaram em  $K_a$  na faixa de 5 a 30  $\text{d}^{-1}$ .

O ano de 2020 apresentou poucos dias em que o método pode ser aplicado, com cerca de 12% dos dias utilizados, enquanto os anos de 2018 e 2019 cerca de 65%. Pela Figura 36 é possível observar que no ano de 2020 há menos dados quando comparado com o restante do período analisado. No ano de 2020 houve uma redução nas vazões decorrente de uma intensa e prolongada estiagem (PARANÁ, 2020), conforme apresentado pela Figura 32, podendo ter influenciado nos resultados medidos pelo sensor.

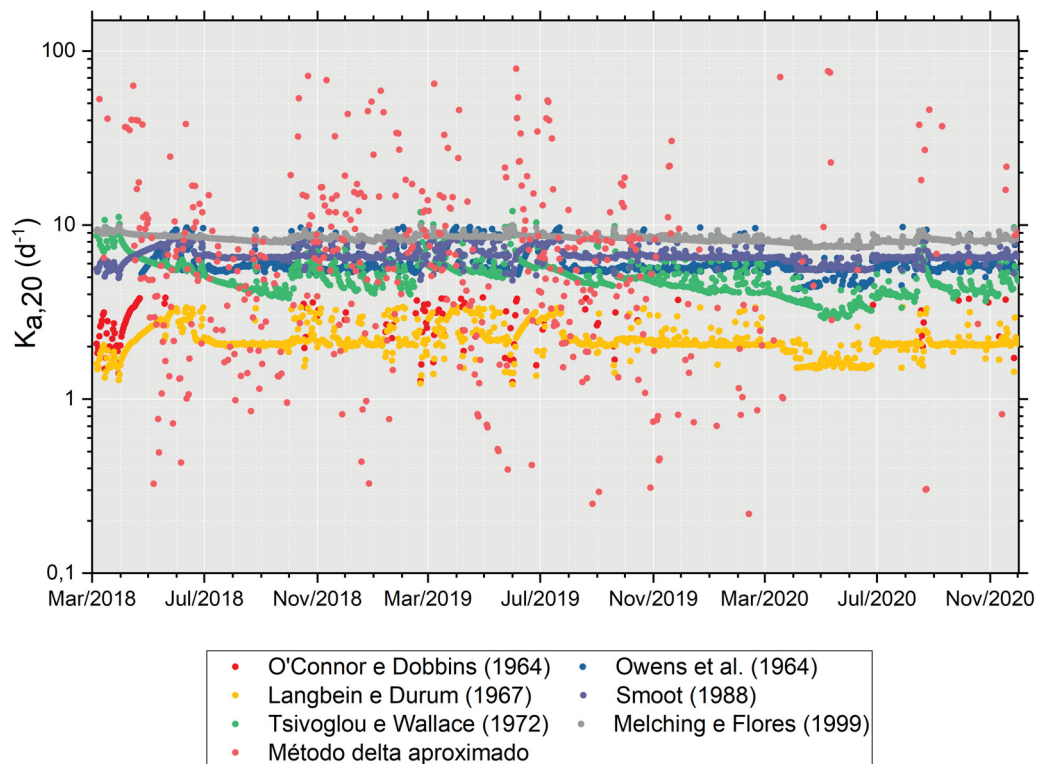


Figura 36 – Valores de  $K_{a,20}$  ( $\text{d}^{-1}$ ) utilizando as equações parametrizadas e pelo método delta aproximado ao longo do tempo.

O modelo do método delta aproximado considera um perfil de oxigênio dissolvido sem influência externa, como lançamento de efluentes, variações na temperatura e nebulosidade, e caso ocorra alguma destas variações, pode resultar em erros no cálculo e nos resultados de  $K_a$  ou invalidar sua aplicação, por conta da taxa de produção não se comportar como

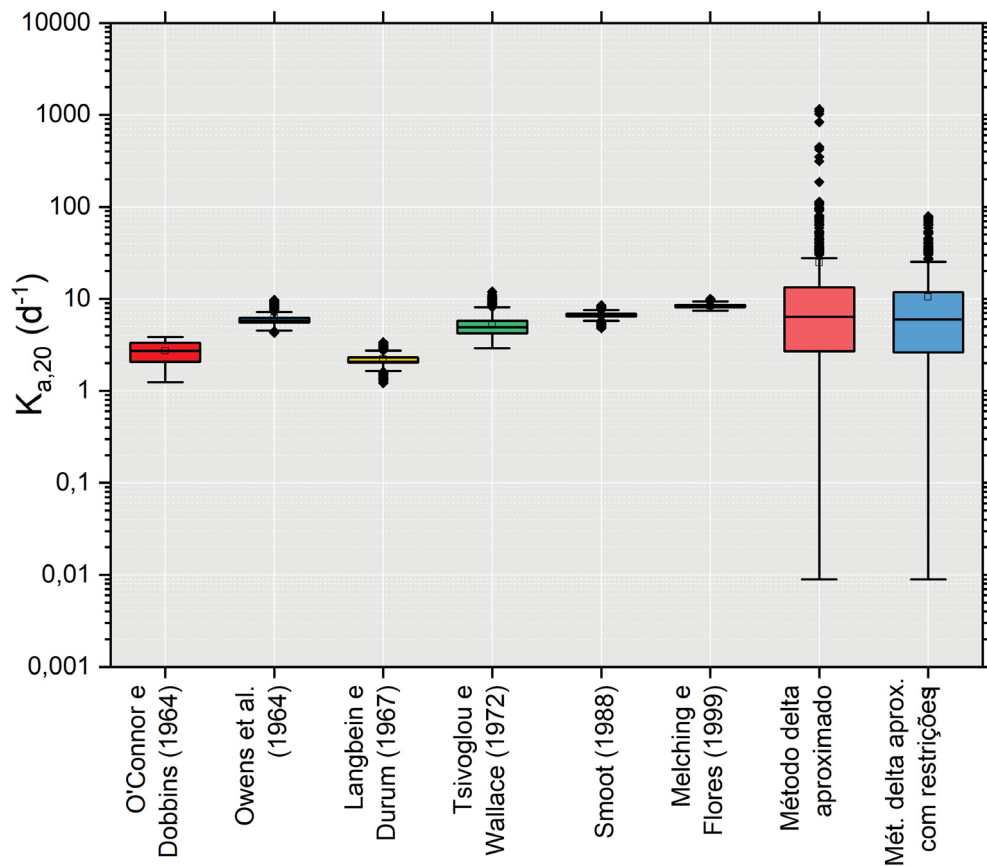


Figura 37 – Boxplot com os valores de  $K_{a,20}$  utilizando as equações parametrizadas e pelo método delta aproximado, com os blocos representando a variação dos dados, com a média e os valores extremos.

o esperado. Além disso, Chapra e Toro (1991) e McBride e Chapra (2005) afirmam que o método é sensível a intervalos de tempo pequenos entre o meio dia solar e o pico de concentração ( $\phi$ ), resultando em  $K_a$  elevados, conforme observado nos resultados (Figuras 36 e 37).

Os dados que produziram máximo de OD anterior ao meio dia solar produzem  $\phi < 0$  e foram naturalmente desconsiderados, bem como máximos não atendendo a relação  $5,3\eta > \phi$  foram descartados. Adicionalmente, foram definidas três restrições na série de dados para estimativa de  $K_a$  não prevista pelos trabalhos originais: (i)  $\phi < 2\Delta t$ , onde  $\Delta t$  representa o intervalo de tempo de medição do sensor, buscando remover dados que produzem  $\phi$  próximo ao intervalo de medição, (ii) dias em que houve variação de OD  $> 0,5$  mg/L em um intervalo de medição, com intuito de remover dados suspeitos, (iii) remoção de dados para dias em que houve uma variação de temperatura da água  $> 3^\circ\text{C}$ , buscando aproximar da premissa do método de temperatura constante.

As Figuras 36 e 37 e apresenta os valores de  $K_a$  de acordo com as equações parametrizadas de O'Connor e Dobbins (1958), Owens, Edwards e Gibbs (1964), Langbein e Durum (1967), Tsivoglou e Wallace (1972), Smoot (1988), Melching e Flores (1999), e o método

delta aproximado para o período entre 01/03/2018 a 02/12/2020.

Tabela 12 – Estatística descritiva para  $K_a$  para cada método.

| Método/Equação                         | Mediana ( $d^{-1}$ ) | Desvio Padrão ( $d^{-1}$ ) |
|----------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| O'Connor e Dobbins (1958)              | 2,7                  | 0,7                        |
| Owens, Edwards e Gibbs (1964)          | 5,8                  | 1,2                        |
| Langbein e Durum (1967)                | 2,1                  | 0,5                        |
| Tsivoglou e Wallace (1972)             | 4,9                  | 1,4                        |
| Smoot (1988)                           | 6,6                  | 0,7                        |
| Melching e Flores (1999)               | 8,4                  | 0,4                        |
| Método delta aproximado                | 6,4                  | 101,0                      |
| Método delta aproximado com restrições | 6,0                  | 13,6                       |

Utilizando as equações parametrizadas de O'Connor e Dobbins (1958) e Langbein e Durum (1967), foram obtidos valores de  $K_a$  na faixa de 2 a 3  $d^{-1}$ , e com as equações de Owens, Edwards e Gibbs (1964), Tsivoglou e Wallace (1972), Smoot (1988) e Melching e Flores (1999) resultou em  $K_a$  na faixa de 4 a 10  $d^{-1}$ . Quando comparado com os valores obtidos pelo método delta aproximado, as equações resultaram em valores menores para  $K_a$  e com variação menor, não apresentando relação clara com os resultados. Após a aplicação das restrições dos dados, os valores obtidos pelo método delta apresentaram uma variação menor e a mediana mais consistentes dos valores encontrados pelas equações paramétricas. A Tabela 12 apresenta a média desses valores.

#### 4.2.1 Regressão múltipla

A Figura 38 apresenta o valor obtido pelo método delta para  $K_a$  para diferentes valores de vazão, profundidade média e velocidade do rio em relação. Em todos os casos não é possível observar uma relação entre os valores de  $K_a$  e os parâmetros hidráulicos do rio Passauna no período em análise. Para um mesmo valor, seja de vazão, profundidade ou velocidade, o método delta resultou numa grande variação (0,5 a 100  $d^{-1}$ ).

Apesar de não apresentar uma tendência, foi ajustada uma equação de regressão múltipla nos resultados, considerando a velocidade média diária e a profundidade média do rio para o período de março de 2018 a dezembro de 2020. A Figura 39 apresenta a equação ajustada em comparação com os valores de  $K_a$  obtidos pelo método Delta.

Pela equação ajustada os valores médio de  $K_a$  são em torno de 10  $d^{-1}$ , com uma variação menor e uma média maior quando comparado com os valores de  $K_a$  calculados com o método Delta. Sendo justificada pela ampla variação nos dados, que poderia ser melhor ajustada com a aplicação de mais restrições aos dados.

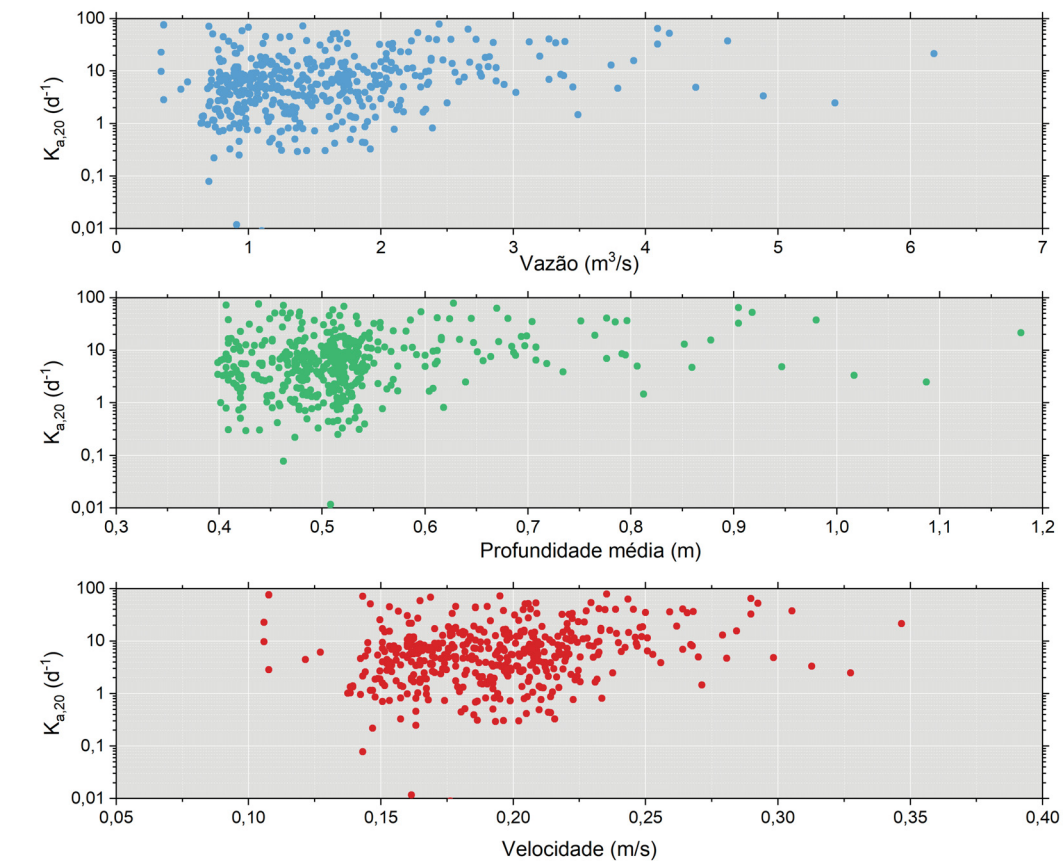


Figura 38 – Valores de  $K_{a,20}$  pelo método delta aproximado com os respectivos valores de vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), profundidade média (m) e velocidade (m/s) para a seção de estudo.

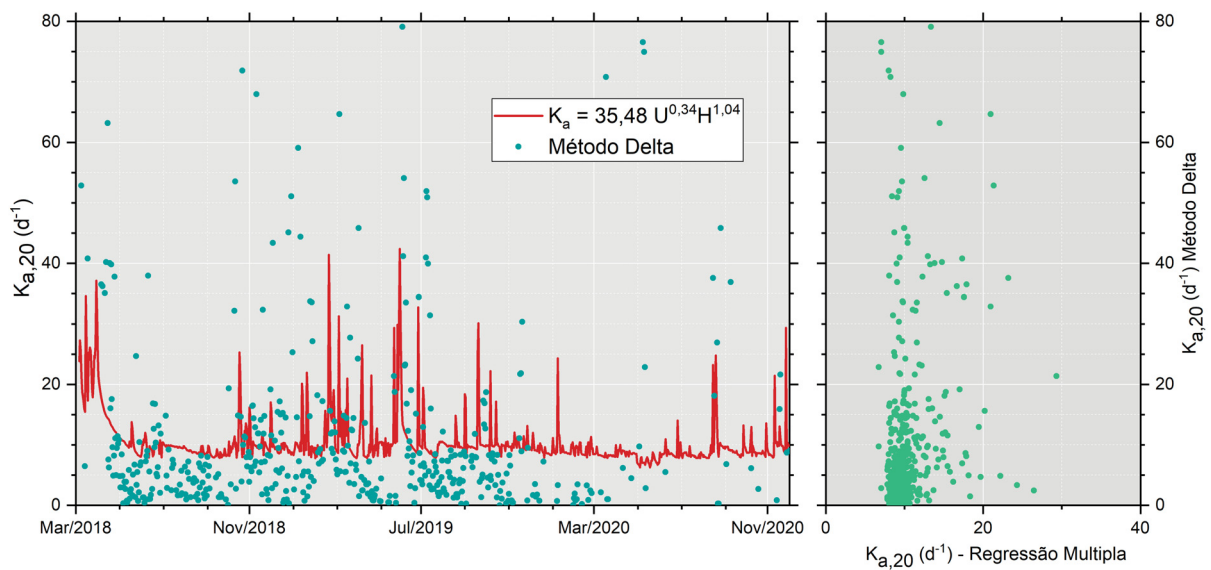


Figura 39 – Comparação dos valores calculados de  $K_a$  utilizando o Método Delta e os obtidos pela equação de regressão múltipla, para o período de março de 2018 a novembro de 2020.

### 4.3 Conclusões

Foi realizada a aplicação do método delta para determinação do coeficiente de reaeração no rio Passaúna com dados contínuos de OD durante aproximadamente 3 anos. Observou-se que os valores de  $K_a$  são sensíveis quando o pico do OD diurno é próximo ao meio-dia solar ( $\phi$  pequeno), conforme destacado por Chapra e Toro (1991) e McBride e Chapra (2005). Com isso, o intervalo de tempo entre as medições pode impactar os resultados, de modo que foram removidos da análise os dias em que  $\phi < 2\Delta t$ . Apesar de arbitrário, o critério de censura buscou remover dados com alta incerteza na determinação de  $\phi$ , dependente da resolução temporal das medições.

Além dos valores obtidos de  $K_a$  serem elevados utilizando o método delta, apresentaram um desvio padrão muito alto, cerca de  $100 \text{ d}^{-1}$ , maior do que os resultados utilizando as equações parametrizadas, que variaram de 2 a  $10 \text{ d}^{-1}$ . Após a aplicação de um conjunto de restrições de aplicação do método, os resultados obtidos pelo método delta tiveram uma variação menor e magnitude próxima aos resultados das equações parametrizadas, apresentando uma mediana de  $6 \text{ d}^{-1}$  e desvio padrão de  $13,6 \text{ d}^{-1}$ . A aplicação das restrições, justificada para qualificar os dados a adequação ao modelo de Chapra e Toro (1991), mostrou-se coerente e sugere estudos futuros em outros rios para estabelecer sua universalidade.

De acordo com o resultados obtidos, apesar de ter sido ajustada uma equação, não foi possível relacionar os valores obtidos de  $K_a$  calculados a partir do método delta com os respectivos valores diários de velocidade e profundidade média do rio. Caso aplicado mais restrições ao método, essa análise deve ser refeita.

## 5 Considerações finais

Nesta seção serão apresentadas as considerações finais sobre os Capítulos 3 e 4, que abordaram a metodologia aplicada e os resultados obtidos para a determinação dos coeficientes de dispersão longitudinal e o de reaeração.

### **Coeficiente de dispersão longitudinal**

Para a organização do experimento é importante analisar previamente o local de estudo e observar os limites de detecção do equipamento utilizado. Estimando assim a massa do traçador a ser lançada, evitando problemas de não detecção do equipamento e desperdício de material. No Apêndice A apresenta um guia com o passo a passo para a determinação de um intervalo de massa do traçador, de acordo com os parâmetros do local de estudo e da faixa desejável de leitura do equipamento.

Com os ensaios realizados no rio Barigui foi possível estimar o coeficiente de dispersão longitudinal com diferentes métodos diretos e indiretos. O método que melhor se ajustou ao cenário foi o método da propagação, principalmente após a correção dos dados pela massa perdida entre as seções de amostragem, que apresentou valores variando de 3,12 a 5,18 m<sup>2</sup>/s.

O método do pico da concentração é sensível ao valor máximo, que após a correção da massa apresentou um aumento de 25% quando comparado com o método da propagação. Os métodos dos momentos, da coroa de concentração e de Chatwin não foram afetados pela perda de massa do traçador, com o método dos momentos apresentando valor médio de 9,53 m<sup>2</sup>/s, enquanto os outros métodos cerca de 9% e 11% a menos que o método da propagação.

Para estudos futuros recomenda-se explorar outras correções aos dados buscando diminuir as incertezas, realizando mais experimentos com o fim de ajustar uma equação para a estimativa de  $D_L$ . Além disso, explorar rios com vazões maiores com o fim de observar se as curvas de concentração ao longo do tempo apresentam menores variações no pico.

O método da coroa permite que se estime  $D_L$  por meio de qualquer valor de concentração ao longo da curva, mas mostrou-se variável se definido próximo ao pico ou próximo à base. Desta forma, definiu-se a mediana de todos os valores. No entanto, recomenda-se estudos futuros para determinar o valor mais adequado a ser extraído da análise pelo método da coroa.

### **Coeficiente de reaeração**

A partir de dados de perfis de oxigênio dissolvido ao longo do dia, no período de 2018 a 2020, para o rio Passaúna, foi possível aplicar o método delta para a determinação do

coeficiente de reaeração. Para comparação dos resultados, foram utilizadas equações parametrizadas para a determinação de  $K_a$  através de dados como velocidade e profundidade média.

Para esta série de dados observou-se uma ampla variação na faixa de  $K_a$ , sendo justificadas pelo método delta ser sensível a intervalos de  $\phi$  pequenos. Desta forma, foi observada a necessidade de aplicar restrições aos dados, com o objetivo de reduzir incertezas, como variações de OD atípicas, de temperatura acima do esperado e ocorrência de máximos de OD próximo ao meio dia solar. Com as restrições, a variação nos resultados diminuíram, com mediana de  $6 \text{ d}^{-1}$  e desvio de  $13,6 \text{ d}^{-1}$ , se aproximando do observado através das equações parametrizadas, com mediana de  $4,7 \text{ d}^{-1}$  e desvio de  $0,8 \text{ d}^{-1}$ .

O método delta aproximado considera que o máximo das taxas de produção primária das algas ocorra no meio-dia solar, e por meio dessa hipótese é calculado  $\phi$ . Para estudos futuros recomenda-se avaliar a influência da radiação solar, restringindo a aplicação dos dados nos dias com alta nebulosidade ou nebulosidade variável.

Adicionalmente, a revisão bibliográfica revelou que há pouca aplicação deste método desde Chapra e Toro (1991). Não há razão para crer porque a estimativa de  $K_a$  pelo método delta não se tornou mais popular. Todavia, este trabalho oferece indícios de que em rios mais prístinos, com menos cargas orgânicas e oriundas de áreas urbanizadas, os resultados podem ser melhores. Neste contexto, recomenda-se a aplicar a mesma metodologia desta pesquisa em um rio considerado mais limpo.

## Referências

- Agência Nacional de Águas (ANA). *Dados da Estação de Dados Hidrológicos*. 2021. HidroWeb. Código da estação: 65021800. Período dos dados: 1984-2021. Disponível em: <<https://www.hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 02/04/2021.
- ALMEIDA, J. d. S. M. d. *Condições de oxigenação e desoxigenação de um trecho do Rio Uberabinha no município de Uberlândia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- APHA. AWWA, WEF. American Public Health Association and American Water Works Association and Water Pollution Control Federation and Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. Water Environment Federation, v. 21, 2005.
- ARAÚJO, J. A. F. de; SANTOS, S. H. et al. Aplicação das equações de streeter-phelps em rios que recebem fontes de poluentes pontuais e difusas, para avaliar o comportamento das concentrações de oxigênio dissolvido. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 10, n. 12, 2014.
- ATKINSON, T.; DAVIS, P. Longitudinal dispersion in natural channels: 1. experimental results from the river severn, uk. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 4, n. 3, p. 345–353, 2000.
- ÁVILA, L. C. *Modelagem da qualidade da água utilizando coeficientes bibliográficos e experimentais-aplicação ao Rio Vacacaí Mirim*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2014.
- BARBOSA JÚNIOR, A. R. et al. Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água naturais: Parte 1-fundamentos teóricos. *Rem: Revista Escola de Minas*, SciELO Brasil, v. 58, p. 27–32, 2005a.
- BARBOSA JÚNIOR, A. R. et al. 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*, SciELO Brasil, v. 58, p. 139–145, 2005b.
- BEHRENS, H. et al. Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. *Hydrogeology journal*, Springer, v. 9, p. 321–325, 2001.
- BEZERRA, I. S. d. O.; MENDONÇA, L. A. R.; FRISCHKORN, H. Autodepuração de cursos d'água: um programa de modelagem streeter phelps com calibração automática e correção de anaerobiose. *Rem: Revista Escola de Minas*, SciELO Brasil, v. 61, p. 249–255, 2008.
- BICUDO, J. R.; JAMES, A. Measurement of Reaeration in Streams: Comparison of Techniques. *Journal of Environmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 117, n. 5, p. 700–701, 1991.
- BRASIL. Resolução CONAMA No 357. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2005.

- CHAPRA, S. C. *Surface water-quality modeling*. Illinois: Waveland press, 2008.
- CHAPRA, S. C.; TORO, D. M. D. Delta method for estimating primary production, respiration, and reaeration in streams. *Journal of environmental engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 117, n. 5, p. 640–655, 1991.
- CHATWIN, P. On the interpretation of some longitudinal dispersion experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 48, n. 4, p. 689–702, 1971.
- CHURCHILL, M. A.; ELMORE, H. L.; BUCKINGHAM, R. A. The prediction of stream reaeration rates. In: *Advances in water pollution research*. London: Pergamon, 1964. p. 89–136.
- COLOMBO, G. *Dinâmica térmica em rios e relações com variáveis meteorológicas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2019.
- CORREA-GONZÁLEZ, J. C. et al. Photosynthesis, respiration and reaeration in a stream with complex dissolved oxygen pattern and temperature dependence. *Ecological modelling*, Elsevier, v. 273, p. 220–227, 2014.
- COSTA, O. *Contribuição à metodologia para determinação indireta do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais de água com emprego do método da sonda solúvel*. 1999. 156f. Tese (Doutorado) — Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Paulo, 1999.
- COSTA, O. S. d. Determinação indireta do coeficiente de reaeração através de dissolução unidimensional de sondas de ácido oxálico. In: *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Mexico: [s.n.], 2000. p. 1–8.
- CURITIBA. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Curitiba. Volume IV - Manual de Drenagem. *Curitiba: Cobrape*, 2012.
- DANCKWERTS, P. Significance of liquid-film coefficients in gas absorption. *Industrial & Engineering Chemistry*, ACS Publications, v. 43, n. 6, p. 1460–1467, 1951.
- DAVIS, P.; ATKINSON, T. Longitudinal dispersion in natural channels: 3. an aggregated dead zone model applied to the River Severn, UK. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 4, n. 3, p. 373–381, 2000.
- DAVIS, P.; ATKINSON, T.; WIGLEY, T. Longitudinal dispersion in natural channels: 2. the roles of shear flow dispersion and dead zones in the River Severn, UK. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus GmbH, v. 4, n. 3, p. 355–371, 2000.
- DENG, Z.; BENGTSSON, L.; SINGH, V. P. Parameter estimation for fractional dispersion model for rivers. *Environmental Fluid Mechanics*, Springer, v. 6, p. 451–475, 2006.
- DENG, Z.-Q.; SINGH, V. P.; BENGTSSON, L. Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers. *Journal of hydraulic engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 127, n. 11, p. 919–927, 2001.
- DEVENS, J. A. *Quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal em pequenos cursos d'água naturais com o uso de traçador ambientalmente neutro*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.

- DEVENS, J. A.; JÚNIOR, A. R. B.; SILVA, G. Q. d. Modelo de quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal de pequenos cursos de água naturais. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 11, p. 269–276, 2006.
- DEVENS, J. A.; JÚNIOR, A. R. B.; SILVA, G. Q. d. Modelos empíricos e semi-empíricos para a obtenção do coeficiente de dispersão longitudinal de pequenos cursos de água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, p. 75–88, 2010.
- DIAS, L. N. A limnological study of the passauna river basin (aruacaria, parana state, brazil): macroscale and mesoscale patterns. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, Taylor & Francis, v. 26, n. 2, p. 865–868, 1997.
- DUARTE, A. A. L. S. et al. Aplicação de modelos matemáticos ao estudo da dispersão longitudinal do rio mondego. In: *Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA)*. Coimbra: [s.n.], 1999.
- DUARTE, U. *Métodos de determinação de vazão com o emprego de traçadores radioativos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1973.
- EIGER, S. Qualidade da água em rios e estuários. *Hidrologia Ambiental*, 1991.
- ELDER, J. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. *Journal of fluid mechanics*, Cambridge University Press, v. 5, n. 4, p. 544–560, 1959.
- FERREIRA, M. d. S. et al. Estimativa do coeficiente de transferência de massa de oxigênio com o uso da técnica das sondas solúveis flutuantes: um estudo de laboratório. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, n. 2, p. 391–402, 2019.
- FISCHER, H. B. et al. *Mixing in inland and coastal waters*. London: Academic Press, Inc., 1979.
- FISHER, H. B. Dispersion predictions in natural streams. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, v. 94, n. 5, p. 927–943, 1968.
- FORMENTINI, T. A. *Coeficientes de desoxigenação e de reaeração superficial em trechos do rio Vacacaí Mirim*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2010.
- FRASSON, V. M. *Análise da dispersão de substâncias conservativas provenientes de acidentes com cargas perigosas em pequenos e médios cursos de águas naturais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- FRENCH, R. H. *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1985.
- FRIGUIS, M. dos S.; GUIMARÃES, M. T. G.; FERREIRA, G. P. Estimativa dos coeficientes de desoxidação e reaeração via equações de streeter-phelps e inferencia bayesiana na praia das palmeiras em cabo frio. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, v. 5, n. 1, 2017.
- GIORGETTI, M.; GIANSAANTI, A. Avaliação do nível de turbulência em águas correntes e sua correlação com o coeficiente de reaeração superficial. In: *Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Brasil: [s.n.], 1983. v. 12, n. 1983, p. 133–138.

- GOLDSCHIEDER, N. et al. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of speleology*, International Union of Speleology, v. 37, n. 1, p. 27–40, 2008.
- GONÇALVES, J. C. d. S. I. *Avaliação de metodologias para a determinação indireta do coeficiente de reoxigenação superficial (K<sub>2</sub>)*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- GONÇALVES, J. C. d. S. I. et al. Técnicas para a estimativa do coeficiente de reaeração superficial. *Ciências ambientais: recursos hídricos*. Alfenas, MG: Carmino Hayashi, 2020. p. 59-83, 2020.
- GRAEPIN, C. *Viabilidade da utilização do método delta aproximado para determinação do coeficiente de reaeração em rios*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- GUALTIERI, C.; GUALTIERI, P.; DORIA, G. P. Dimensional analysis of reaeration rate in streams. *Journal of environmental engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 128, n. 1, p. 12–18, 2002.
- HAIDER, H.; ALI, W.; HAYDAR, S. Evaluation of various relationships of reaeration rate coefficient for modeling dissolved oxygen in a river with extreme flow variations in pakistan. *Hydrological Processes*, Wiley Online Library, v. 27, n. 26, p. 3949–3963, 2013.
- HEMOND, H. F.; FECHNER, E. J. *Chemical fate and transport in the environment*. San Diego: Academic Press, 2014.
- JIN, H.-S. et al. Mixed tracer injection method to measure reaeration coefficients in small streams. *Water, Air, & Soil Pollution*, Springer, v. 223, n. 8, p. 5297–5306, 2012.
- JIRKA, G. H. *Mixing and dispersion in rivers*. London: CRC Press, 2004. v. 1. 13–27 p.
- KASHEFIPOUR, S. M.; FALCONER, R. A. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels. *Water Research*, Elsevier, v. 36, n. 6, p. 1596–1608, 2002.
- KIM, K.-C. et al. Analysis on the characteristics of a pollutant dispersion in river environment. *Annals of Nuclear Energy*, Elsevier, v. 38, n. 2-3, p. 232–237, 2011.
- LANGBEIN, W. B.; DURUM, W. H. *The aeration capacity of streams*. [S.l.]: US Department of the Interior, Geological Survey, 1967. v. 542.
- LAUNAY, M. et al. Calibrating pollutant dispersion in 1-d hydraulic models of river networks. *Journal of Hydro-environment Research*, Elsevier, v. 9, n. 1, p. 120–132, 2015.
- LEITHOLD, J.; SCHMIDT, M. A. R.; FERNANDES, C. V. S. Avanço antrópico na bacia hidrográfica do rio barigui entre 1999 e 2019 e seu impacto sobre o escoamento superficial avaliado pela alteração da sua curva-número (cn). *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 17, n. 2020, 2020.
- LEWIS, W. K.; WHITMAN, W. G. Principles of gas absorption. *Industrial & Engineering Chemistry*, ACS Publications, v. 16, n. 12, p. 1215–1220, 1924.
- LIMA, A. S. A. *Modelação do transporte e dispersão de um marcador corado no rio Febros*. Tese (Doutorado) — Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2009.

- LIU, H. Predicting dispersion coefficient of streams. *Journal of the Environmental Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, v. 103, n. 1, p. 59–69, 1977.
- MARION, A.; ZARAMELLA, M. Effects of velocity gradients and secondary flow on the dispersion of solutes in a meandering channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 132, n. 12, p. 1295–1302, 2006.
- MATEUS, M. V. et al. Análise de incerteza e modelagem de qualidade da água do rio uberaba, minas gerais. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, n. 37, p. 1–15, 2015.
- MCBRIDE, G. B.; CHAPRA, S. C. Rapid calculation of oxygen in streams: approximate delta method. *Journal of Environmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 131, n. 3, p. 336–342, 2005.
- MCQUIVEY, R. S.; KEEFER, T. N. Simple method for predicting dispersion in streams. *Journal of the environmental engineering Division*, American Society of Civil Engineers, v. 100, n. 4, p. 997–1011, 1974.
- MELCHING, C. S.; FLORES, H. E. Reaeration equations derived from us geological survey database. *Journal of Environmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 125, n. 5, p. 407–414, 1999.
- MOORE, R. et al. Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement part 2: Constant-rate injection. *Streamline Watershed Management Bulletin*, Citeseer, v. 8, n. 1, p. 11–15, 2004.
- MORSE, N. et al. Using sound pressure to estimate reaeration in streams. *Journal of the North American Benthological Society*, v. 26, n. 1, p. 28–37, 2007.
- MUDAK-WRM. *Multidisciplinary Data Acquisition as Key for a Globally Applicable Water Resource Management. Unpublished data from research project partners. Project coordinated by Dr.-Ing Stephan Fuchs and Dr.-Ing. Tobias Bleninger*. Brasil - Alemanha, 2019.
- NGUYEN, M. T. *Reaeration and an oxygen transfer model for tropical reservoirs*. Tese (Doutorado) — School of Civil and Environmental Engineering - Nanyang Technological University, 2013.
- NUNES, D. G. *Modelagem da autodepuração e qualidade da água do rio Turvo Sujo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- O'CONNOR, D. J.; DOBBINS, W. E. Mechanism of reaeration in natural streams. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, ASCE, v. 123, n. 1, p. 641–666, 1958.
- OLIVEIRA, V. V. d. *Quantificação e avaliação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.
- OWENS, M.; EDWARDS, R.; GIBBS, J. Some reaeration studies in streams. *Air and water pollution*, v. 8, p. 469, 1964.

- PARANÁ. *Governo do Estado do Paraná. Paraná sofre com estiagem mais severa dos últimos anos*. 2020. Desenvolvimento Sustentável. Acesso em: 30 mai. 2023. Disponível em: <<https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Parana-sofre-com-estiagem-mais-severa-dos-ultimos-anos>>.
- PARK, I. et al. Comparisons of two types of particle tracking models including the effects of vertical velocity shear. *Water*, MDPI, v. 12, n. 12, p. 3535, 2020.
- PEREIRA, C. E. et al. Dispersion of pollutants in watercourses intercepted by highway br-050, in the triângulo mineiro region, minas gerais, brazil. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 38, n. 2, p. 153–161, 2016.
- PME. *Precision Measurement Engineering - miniDOT Clear Logger Manual*. [S.l.], 2021.
- QUEIROZ, F. M. d.; MATOS, A. T. d.; SPERLING, M. v. Estimativa do coeficiente de reaeração da água em canal raso de fundo deslizante. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 20, n. 1, p. 79–88, 2015.
- RATHBUN, R.; GRANT, R. S. *Comparison of the radioactive and modified techniques for measurement of stream reaeration coefficients*. US Geological Survey, 1978.
- RIBEIRO, C. B. d. M. et al. Desenvolvimento e validação de equação para determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em rios de médio porte. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 15, p. 393–400, 2010.
- RIGO, D. *Dispersão longitudinal em rios: desempenho de métodos de previsão e de traçadores fluorescentes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1992.
- RODRIGUES, P. P. G. W. et al. Evaluation of dispersion parameters for river sao pedro, brazil, by the simulated annealing method. *Inverse Problems in Science and Engineering*, Taylor & Francis, v. 21, n. 1, p. 34–51, 2013.
- ROSMAN, P. C. C. et al. Referência técnica do SisBaHiA®. *COPPE–Universidade Federal do Rio de Janeiro*, Março, 2015.
- RUNKEL, R. L. On the use of rhodamine wt for the characterization of stream hydrodynamics and transient storage. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 51, n. 8, p. 6125–6142, 2015.
- RUTHERFORD, J. C. *River mixing*. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.
- SANEPAR. - Companhia de Saneamento do Paraná. Plano Diretor SAIC: Sistema de Abastecimento de Água Integrado de Curitiba e Região Metropolitana. *Curitiba: Sanepar*, 2013.
- SEO, I. W.; CHEONG, T. S. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. *Journal of hydraulic engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 124, n. 1, p. 25–32, 1998.
- SILVA, G. M. d. *Análise dos efeitos da velocidade na modelagem numérica da dispersão de efluentes em rios e canais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2018.

- SILVA, L. L. d. et al. Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. *Química nova*, SciELO Brasil, v. 32, p. 1576–1585, 2009.
- SILVA, P. de S. L. et al. Humic substances reduce the oxygen mass transfer in the air–water interface. *AIChE Journal*, Wiley Online Library, v. 66, n. 6, p. e16971, 2020.
- SILVA, P. V. R. M. d.; PECLY, J. O. G.; AZEVEDO, J. P. S. d. Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no rio piabanha (RJ) para a modelagem quali-quantitativa pelo hec-ras. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 22, p. 463–472, 2017.
- SMOOT, J. L. *An examination of stream reaeration coefficients and hydraulic conditions in a pool-and-riffle stream*. Tese (Doutorado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, 1988.
- SOARES, P. A.; PINHEIRO, A.; ZUCCO, E. Determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em rios. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 10, n. 2, p. 27–36, 2013.
- SOCOLOFSKY, S.; JIRKA, G. Mixing in rivers: Turbulent diffusion and dispersion. *Special Topics in Mixing and Transport Processes in the Environment*, eds. SA Socolofsky and GH Jirka, *Texas A&M University, Texas, USA*, p. 51–71, 2005.
- SPERLING, M. V. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996. v. 1.
- SPERLING, M. von. II - 401 - Determinação do coeficiente de reaeração de cursos d'água (K2) utilizando fórmulas empíricas. In: . [S.l.]: 23 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2005.
- STULL, R. B. et al. *Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science*. [S.l.: s.n.], 2015.
- SUDERHSA. *Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba, Relatório Final - Volume 4: Capacidade do Sistema Atual e Medidas de Controle de Cheias - Tomo 4.9: Modelagem das Linhas de Inundação da Bacia do Rio Barigui*. [S.l.], 2002. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Plano-de-Drenagem-do-Alto-Iguacu>>.
- TAYFUR, G.; SINGH, V. P. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by artificial neural network. *Journal of hydraulic engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 131, n. 11, p. 991–1000, 2005.
- TENEBE, I. T. et al. Estimation of longitudinal dispersion co-efficient: A review. *Cogent Engineering*, Taylor & Francis, v. 3, n. 1, p. 1216244, 2016.
- TSIVOGLU, E.; WALLACE, J. Characterizing stream reaeration capacity. *US Environmental Protection Agency Report*, 1972.
- Turner Desing. *AquaFluor - Handheld Fluorometer and Turbidimeter - Manual*. [S.l.], 2018.

WILCOCK, B. et al. *Continuous measurement and interpretation of dissolved oxygen data in rivers*. [S.l.]: National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd, 2011.

ZISON, S. W. *Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling*. [S.l.]: Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Environmental Research Laboratory, 1978.

# APÊNDICE A – Estimativa da massa do traçador a ser lançada

Para a estimativa da massa do traçador a ser lançada no rio, foi realizada uma análise inicial para que a quantidade lançada fosse detectável pelo fluorímetro, sem que houvesse desperdício do corante utilizado. Neste apêndice são detalhados os cálculos adaptados da apostila de Socolofsky e Jirka (2005).

Para a determinação da massa do traçador a ser lançada é necessário estimar previamente o comprimento de mistura do rio, as seções a jusante para a coleta das amostras, o  $D_L$  e o tempo da passagem do pico, de acordo com as características físicas do local do estudo, como largura e profundidade do trecho, área da seção transversal, velocidade média e a velocidade de atrito. O período de Taylor em que a equação unidimensional da advecção dispersão (Equação 2.30) é válida, se dá a partir desta zona de mistura. Desta forma, as medições devem ser realizadas a uma distância superior ao comprimento de mistura.

O comprimento de mistura pode ser estimado utilizando a equação de Fischer et al. (1979) para lançamento nas margens

$$L_M = 0,10U \frac{B^2}{\varepsilon_t} \quad (\text{A.1})$$

no qual  $L_M$  é o comprimento da zona advectiva (m),  $U$  é a velocidade média (m/s),  $B$  é a largura média (m) e  $\varepsilon_t$  é o coeficiente de difusão turbulenta transversal. O  $\varepsilon_t$  é aproximado como  $\varepsilon_t = 0,15Hu^*$ , onde  $H$  é a profundidade média no trecho (m) e  $u_*$  a velocidade de atrito ( $u_*\sqrt{\tau_0/\rho}$ ). Após a determinação do comprimento de mistura, de acordo com as características do local do experimento, devem ser definidas posições  $x_1$  e  $x_2$  em que poderiam ser feitas as medições ( $x_2 > x_1 > L_M$ ).

O coeficiente de dispersão longitudinal, apesar de ser o objeto de estudo do experimento, é utilizado para a estimativa da massa do traçador, sendo necessário estimar previamente  $D_L$ , como uma referência. Conforme apresentado na Tabela 1 existem diversas equações tabeladas, para esse trabalho foram consideradas as equações propostas por Fischer et al. (1979) e Deng, Singh e Bengtsson (2001)

$$D_L = 0,011 \frac{U^2 B^2}{Hu_*}, \quad (\text{A.2})$$

$$D_L = \frac{0,15}{8\varepsilon_{t0}} \left(\frac{B}{H}\right)^{5/3} \left(\frac{U}{u_*}\right)^2 Hu_*, \quad (\text{A.3})$$

com

$$\epsilon_{t0} = 0,145 + \frac{1}{3520} \left( \frac{U}{u_*} \right) \left( \frac{B}{H} \right)^{1,38}, \quad (\text{A.4})$$

O tempo ( $t$ ) do lançamento do traçador até a passagem do pico da pluma na seção de amostragem é calculado pela equação de

$$t_{pico} = \frac{D_L}{U} + \sqrt{\frac{D_L^2}{U^4} + \frac{x^2}{U^2}}. \quad (\text{A.5})$$

Após as estimativas de  $L_M$ ,  $D_L$  e o  $t_{pico}$  para  $x_1$  e  $x_2$ , é realizada a primeira análise para a quantidade necessária de traçador. Considerando o fluorímetro AquaFluor® da Turner Designs, com faixa de detecção de 0 – 400ppb, deseja-se que seja capaz de realizar a leitura nos pontos  $x_1$  e  $x_2$  de toda curva. A Figura 40 ilustra o experimento ao longo do tempo, com a massa do traçador lançada em  $t_0$  e as concentrações nos pontos  $x_1$  e  $x_2$  dentro da faixa de concentração detectável pelo fluorímetro. Tendo o ponto crítico máximo como o valor do pico da primeira curva e o ponto crítico mínimo como o valor mínimo da segunda curva, considerando, aqui 95% da área da curva.

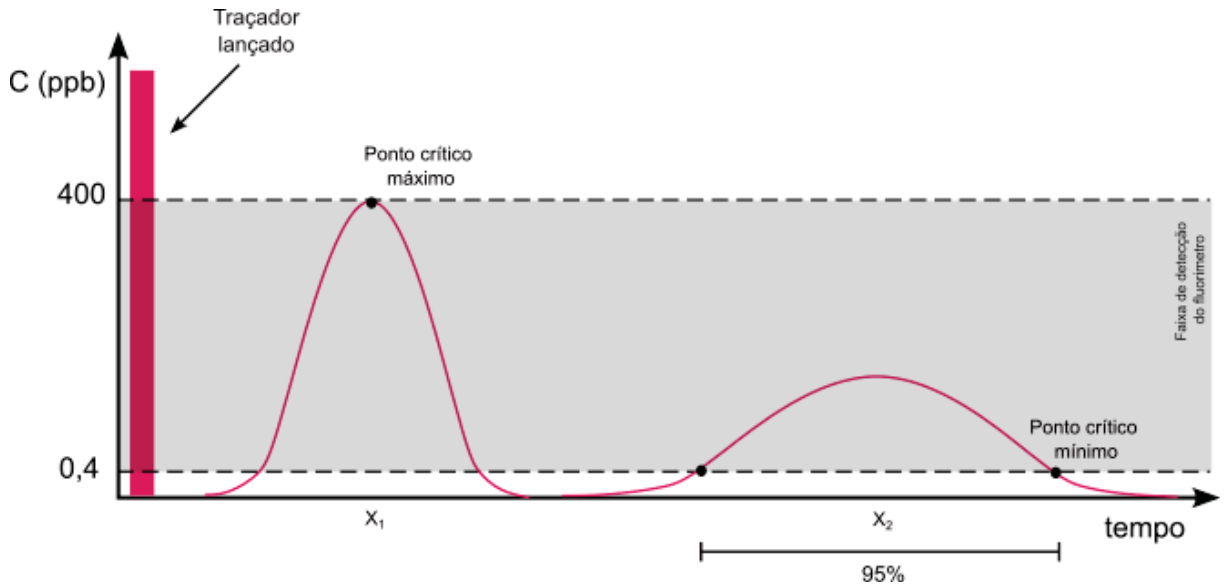


Figura 40 – Ilustração da concentração do traçador ao longo do tempo, para os pontos  $x_1$  e  $x_2$ , dentro da faixa de detecção (0 – 400ppb) do fluorímetro AquaFluor® da Turner Designs.

Para a estimativa da massa máxima a ser lançada do traçador, foi considerado que a concentração máxima, ou seja, o pico da pluma em  $x_1$ , é 400ppb, o máximo detectável pelo fluorímetro, com  $t_{pico}$  calculado pela Equação A.5. Sendo assim, a massa do traçador máxima ( $M_{máx}$ ) é calculada considerando a solução da equação da dispersão longitudinal (2.30) como

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{400A\sqrt{4\pi D_L t_{pico}}}{\exp\left(-\frac{(x_1 - Ut_{pico})^2}{4D_L t_{pico}}\right)}. \quad (A.6)$$

Para a massa mínima do traçador detectável pelo equipamento, foi considerado a relação  $\sigma = \sqrt{2D_L t}$ , em que a curva da concentração ao longo do tempo é aproximada por uma curva com a forma de uma distribuição gaussiana, com  $4\sigma$  representando cerca de 95% da área da curva. Sendo assim, o tempo é calculado como  $t_{cmin} = t_{pico} - 2\sigma$ , com a concentração sendo o mínimo detectável 0,4ppb para  $x_2$ . A massa mínima ( $M_{min}$ ) é calculada de maneira similar a  $M_{m\acute{a}x}$ :

$$M_{min} = \frac{0,4A\sqrt{4\pi D_L t_{cmin}}}{\exp\left(-\frac{(x_2 - Ut_{cmin})^2}{4D_L t_{cmin}}\right)}. \quad (A.7)$$

Após a primeira estimativa que explora todo o intervalo de operação do sensor, foi arbitrado uma segunda faixa ideal de concentração, com o objetivo de diminuir a quantidade de massa lançada e manter o experimento afastado dos limites de operação do sensor. Foi escolhido que o limite inferior seria uma ordem de grandeza maior e o superior uma ordem de grandeza menor, equivalentes a 4 a 40ppb respectivamente. Sendo refeitos os cálculos utilizando os dois valores de  $D_L$  propostos por Fischer et al. (1979) e Deng, Singh e Bengtsson (2001) (Equações A.2 e A.3).

Como resultado final, foi determinado que o valor mínimo que seria lançado, seria o valor máximo das situações que estimaram as massas mínimas, e o valor máximo, seria o valor mínimo das situações que estimaram as massas máximas.

A Figura 40 apresenta a planilha com todos os cálculos descritos, com os respectivos resultados, para as seções dos pontos de amostragem P2 e P4.

| Dados de entrada                  |             |          | Coef. Disp. long - Fischer (1979) |                 |         | Coef. Disp. long - Deng (2001) |         |                 |        |         |                 |
|-----------------------------------|-------------|----------|-----------------------------------|-----------------|---------|--------------------------------|---------|-----------------|--------|---------|-----------------|
| Parametro                         | Unidade     | Valor    | x (m)                             | t (s)           | c (ppb) | x (m)                          | t (s)   | c (ppb)         |        |         |                 |
| Área                              | m2          | 5,5      |                                   | pico            | 2607,7  | 400                            |         | pico            | 2575,8 | 400,0   |                 |
| Largura do trecho                 | m           | 7,9      |                                   | 5%              | 2426,8  | 283,2                          |         | 5%              | 2203,4 | 273,4   |                 |
| Profundidade do trecho            | m           | 0,7      | 1047                              | 95%             | 2788,6  | 296,2                          | 1047    | 95%             | 2948,1 | 301,1   |                 |
| Velocidade média                  | m/s         | 0,4      |                                   |                 |         |                                |         |                 |        |         |                 |
| u*                                | m/s         | 0,1      |                                   |                 | σ (s)   | 90,465                         |         |                 | σ (s)  | 186,183 |                 |
| x1                                | m           | 1047     |                                   | massa (kg -- g) | 0,502   | 502,1                          |         | massa (kg -- g) | 1,036  | 1036,5  |                 |
| x2                                | m           | 2292     |                                   | pico            | 5720,2  | 0,56                           |         | pico            | 5688,1 | 0,57    |                 |
| Comprimento de mistura            | m           | 237,75   |                                   | 5%              | 5452,2  | 0,40                           |         | 5%              | 5134,7 | 0,40    |                 |
| Coef. Disp. long - Fischer (1979) | m²/s        | 1,5692   | 2292                              | 95%             | 5988,2  | 0,41                           | 2292    | 95%             | 6241,4 | 0,43    |                 |
| E0                                |             | 0,1772   |                                   |                 |         |                                |         |                 |        |         |                 |
| Coef. Disp. long - Deng (2001)    | m²/s        | 6,7289   |                                   |                 | σ (s)   | 133,985                        |         |                 | σ (s)  | 276,675 |                 |
| Coef. Disp. vert - Fischer (1979) | m²/s        | 0,0105   |                                   | massa (kg -- g) | 0,001   | 1,04                           |         | massa (kg -- g) | 0,002  | 2,20    |                 |
| Dados do fluorímetro              |             |          | x (m)                             | t (s)           | c (ppb) | x (m)                          | t (s)   | c (ppb)         |        |         |                 |
| Faixa de detecção (ppb)           | 0,4         | 400      |                                   | pico            | 2607,7  | 40                             |         | pico            | 2575,8 | 40,0    |                 |
| Faixa "ideal" (ppb)               | 4           | 40       |                                   | 5%              | 2426,8  | 28,32                          |         | 5%              | 2203,4 | 27,3    |                 |
| Massa do traçador                 |             |          | 1047                              | 95%             | 2788,6  | 29,62                          | 1047    | 95%             | 2948,1 | 30,1    |                 |
| Coef. Disp. Long                  | Faixa (ppb) | Mmin (g) |                                   | Mmax (g)        |         | σ (s)                          |         | 90,465          |        | σ (s)   | 186,183         |
| Fischer (1979)                    | 0,4 - 400   | 1,04     |                                   | 502,07          |         | massa (kg -- g)                |         | 0,050           | 50,21  |         | massa (kg -- g) |
|                                   | 4 - 40      | 10,40    | 50,21                             |                 | pico    | 5720,2                         | 5,60    |                 | pico   | 5688,1  | 5,72            |
|                                   | 0,4-400     | 2,20     | 1036,48                           |                 | 5%      | 5452,2                         | 4,00    |                 | 5%     | 5134,7  | 4,00            |
| Deng (2001)                       | 4 - 40      | 21,97    | 103,65                            | 2292            | 95%     | 5988,2                         | 4,12    | 2292            | 95%    | 6241,4  | 4,26            |
|                                   |             |          |                                   |                 |         | σ (s)                          | 133,985 |                 |        | σ (s)   | 276,675         |
|                                   |             |          |                                   |                 |         | massa (kg -- g)                | 0,010   |                 | 10,4   |         | massa (kg -- g) |
| Faixa recomendada                 |             | 21,97    | 50,21                             |                 |         |                                |         |                 |        |         |                 |

Figura 41 – Planilha com o cálculo da estimativa da massa do traçador lançada no rio para os trechos P2 e P4.

## APÊNDICE B – Gráficos após a aplicação do fator de correção pela área da bacia

Neste apêndice são apresentados os gráficos relacionados aos métodos da propagação (Figura 42), método da coroa de concentração (Figura 43) e o método de Chatwin (Figuras 44 a 47) após a aplicação do fator de correção da área da bacia apresentado na Seção 3.2.5.1.

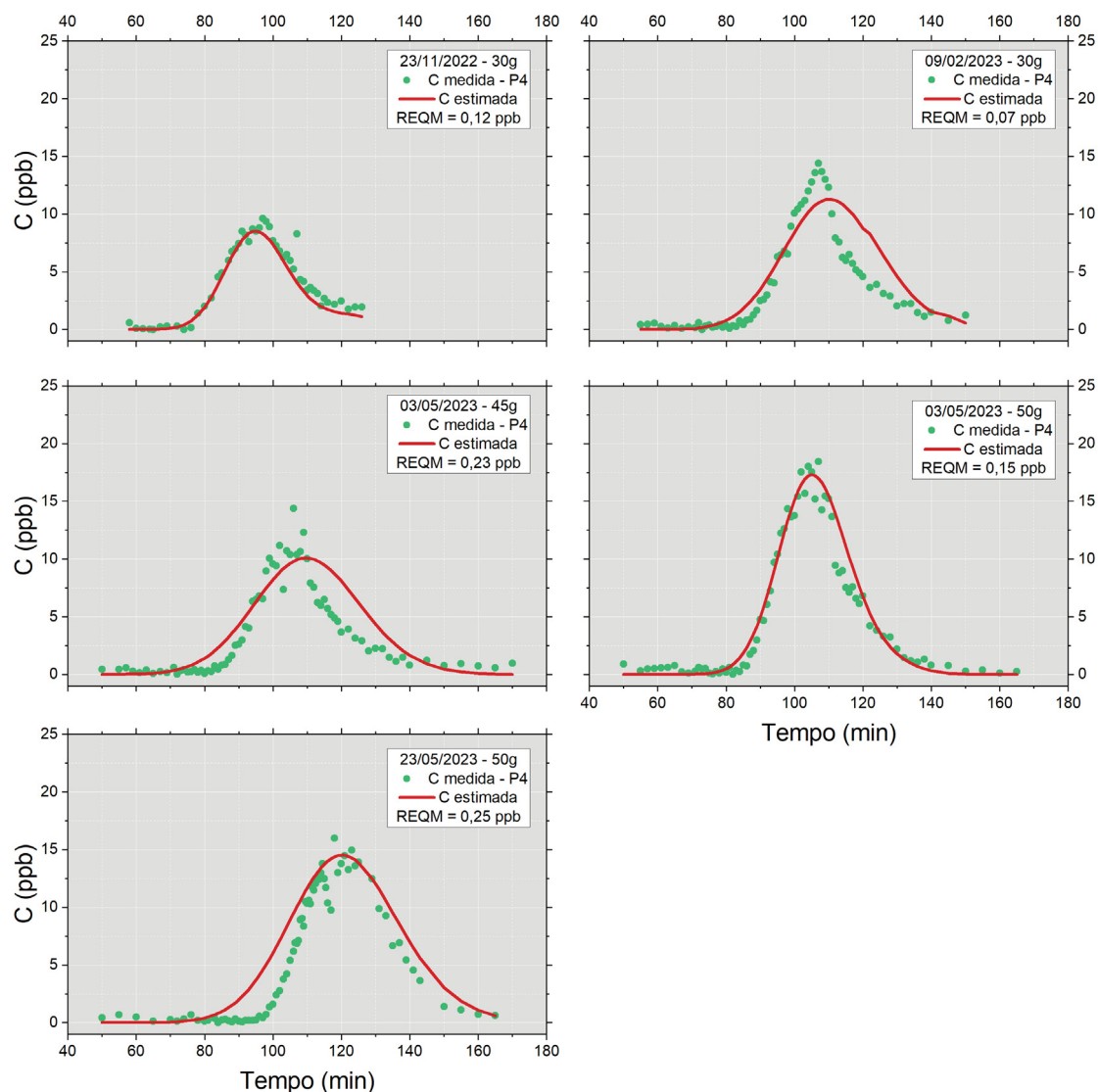


Figura 42 – Curva de concentração medido em campo na segunda seção de amostragem e o perfil de concentração estimado utilizando o método da propagação, para os ensaios E3, E4, E5, E6 e E7.

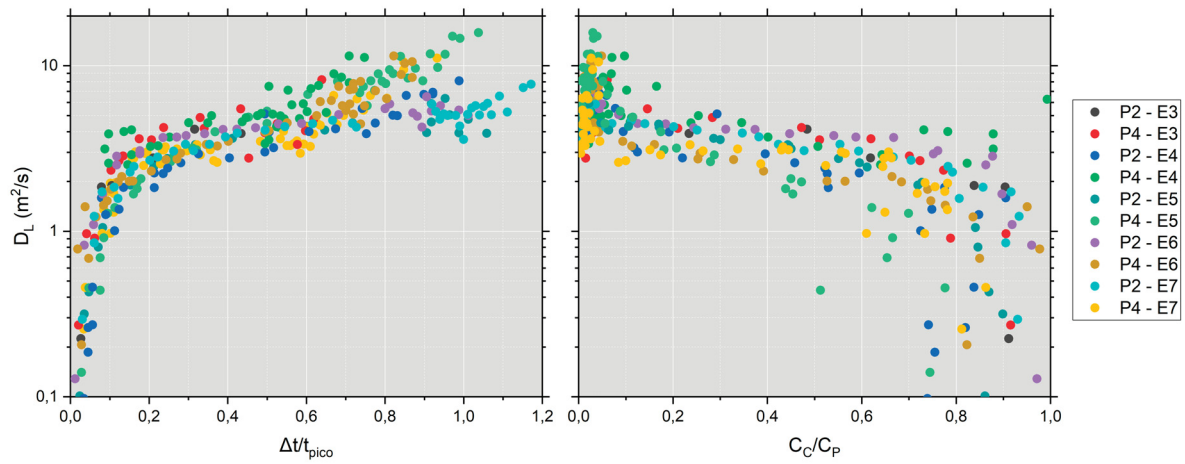


Figura 43 – Relação entre  $D_L$  com  $\Delta t$  e  $C_C/C_P$ , com o resultado obtido utilizando o método da coroa de concentração para cada seção de amostragem e os ensaios E3, E4, E5, E6 e E7.

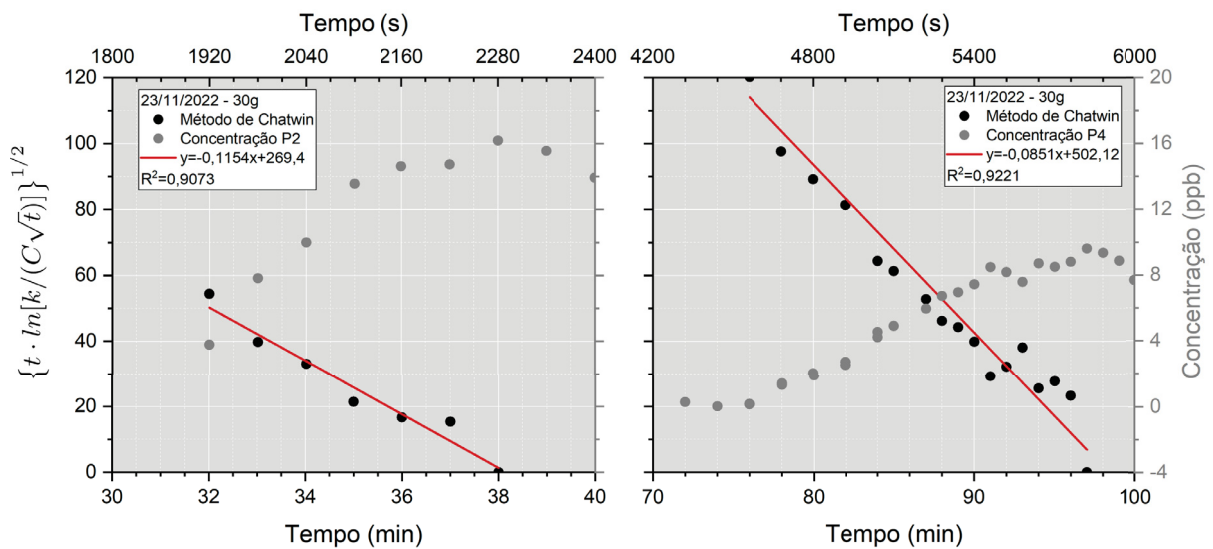


Figura 44 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 23/11/2022.

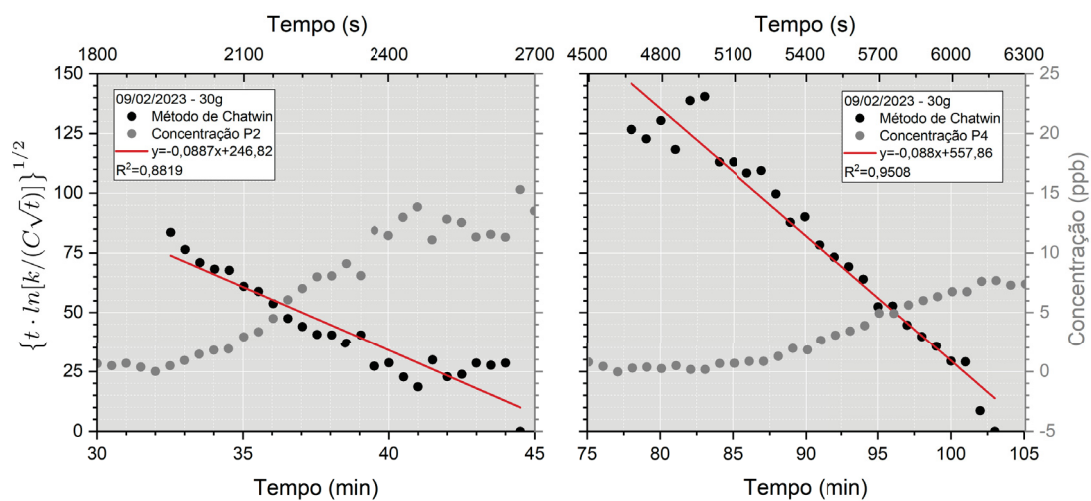


Figura 45 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 09/02/2023.

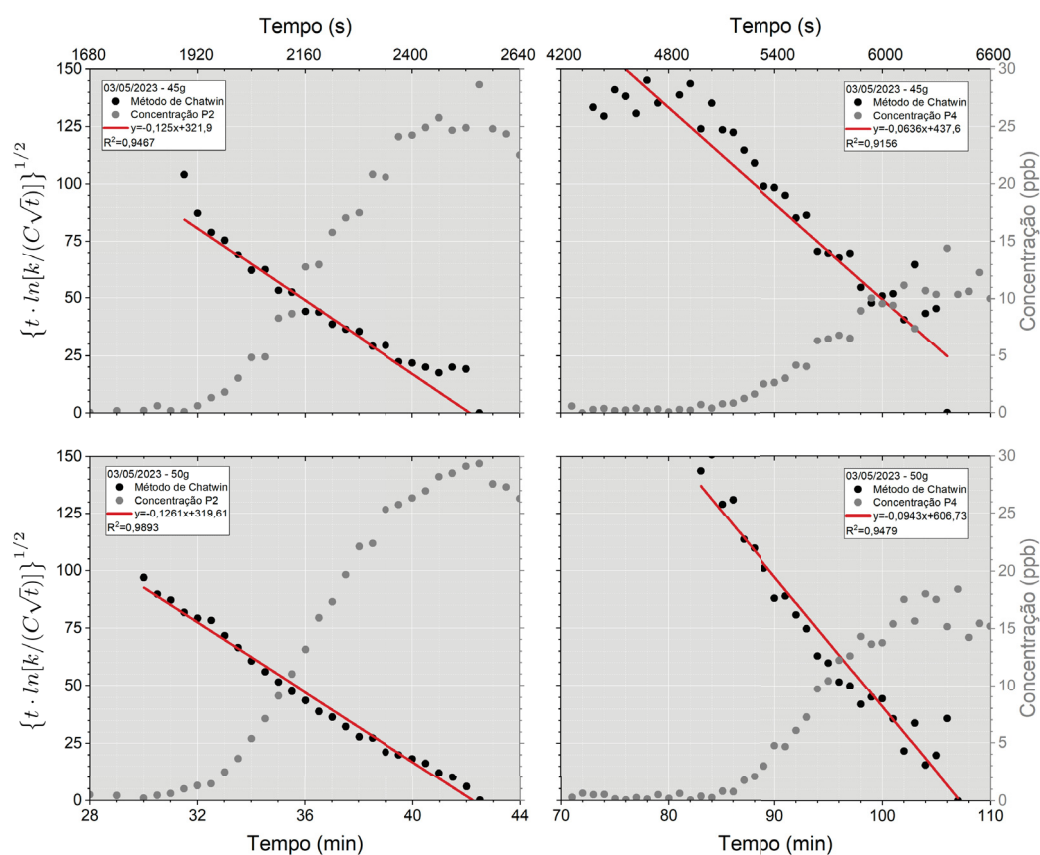


Figura 46 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 03/05/2022.

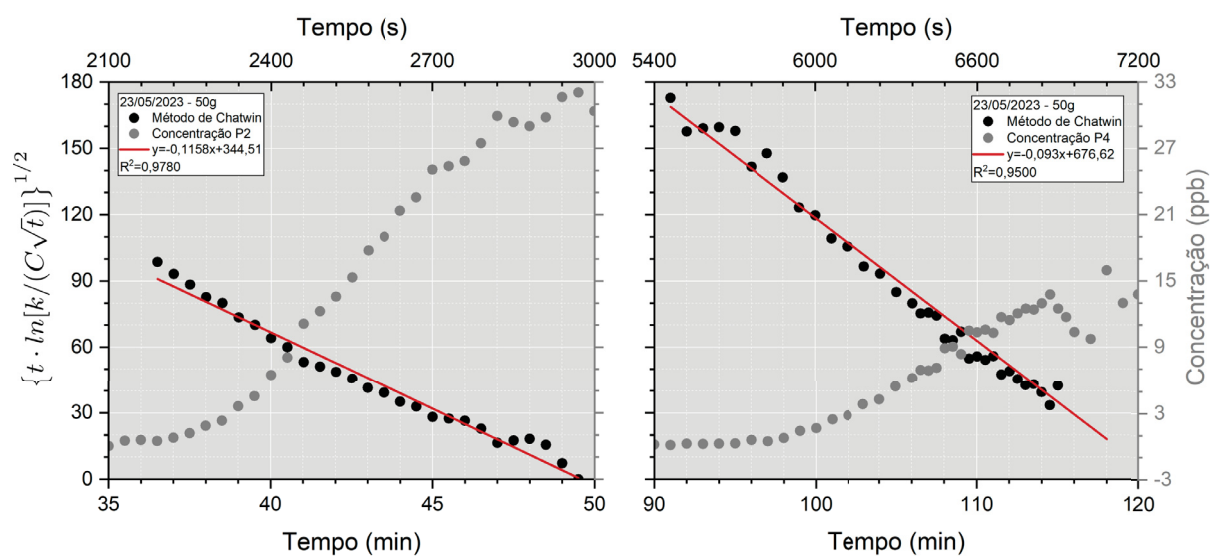


Figura 47 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 23/05/2022.

## APÊNDICE C – Gráficos após a aplicação do fator de correção pela massa recuperada

Neste apêndice são apresentados os gráficos relacionados aos métodos da propagação (Figura 48), método da coroa de concentração (Figura 49) e o método de Chatwin (Figuras 50 a 53) após a aplicação do fator de correção da massa recuperada apresentado na Seção 3.2.5.2.

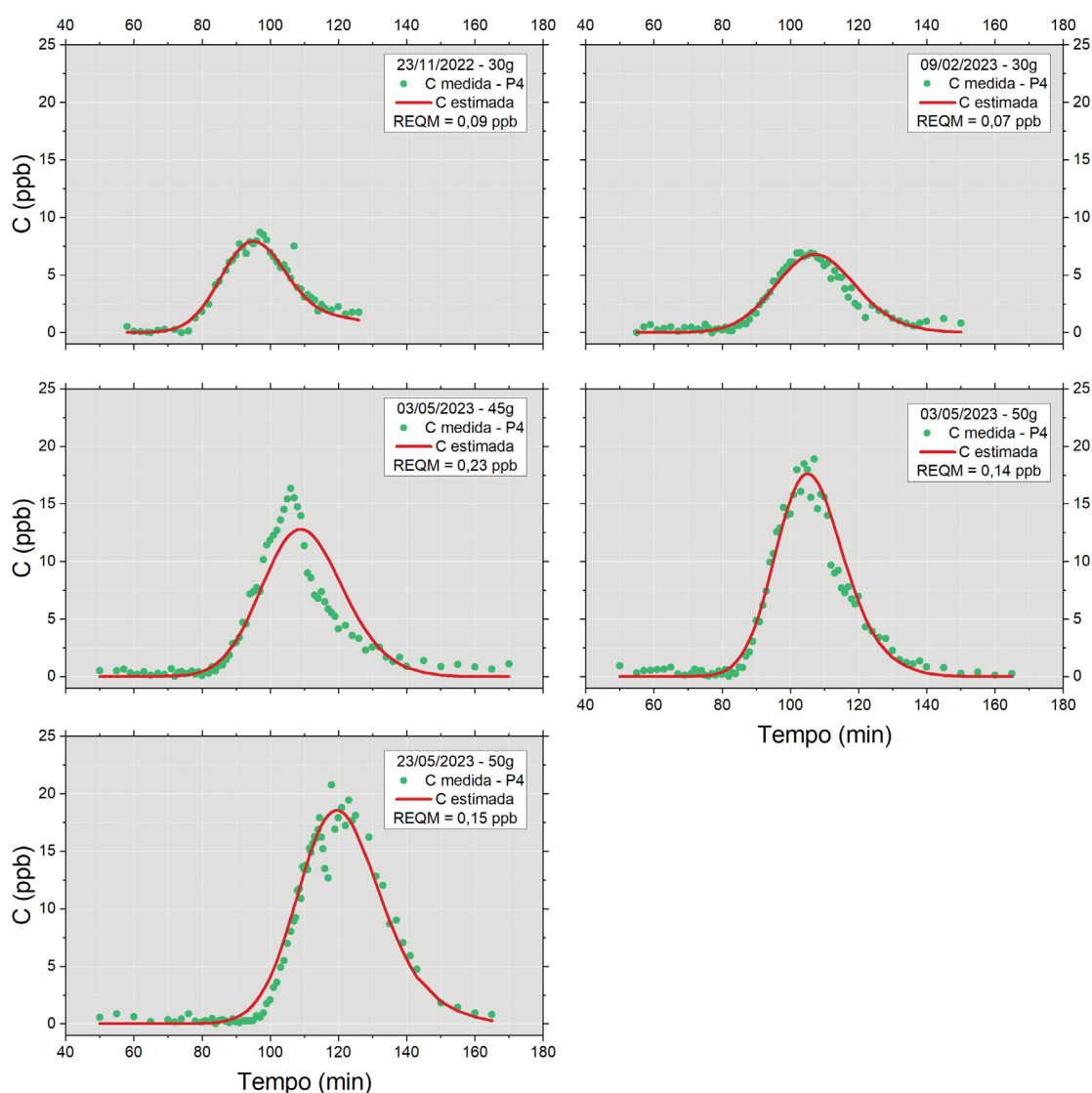


Figura 48 – Curva de concentração medido em campo na segunda seção de amostragem e o perfil de concentração estimado utilizando o método da propagação, para os ensaios E3, E4, E5, E6 e E7.

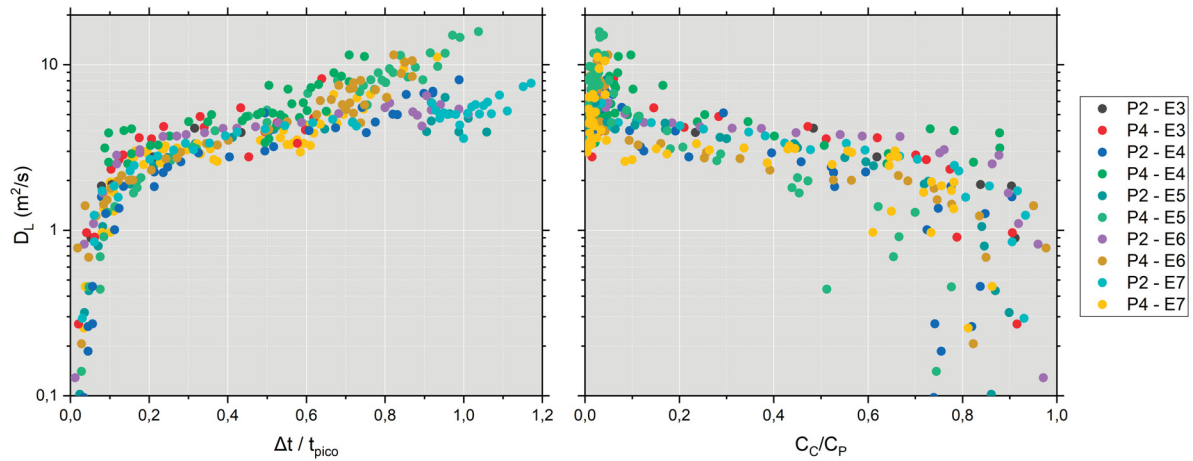


Figura 49 – Relação entre  $D_L$  com  $\Delta t$  e  $C_C/C_P$ , com o resultado obtido utilizando o método da coroa de concentração para cada seção de amostragem e os ensaios E3, E4, E5, E6 e E7.

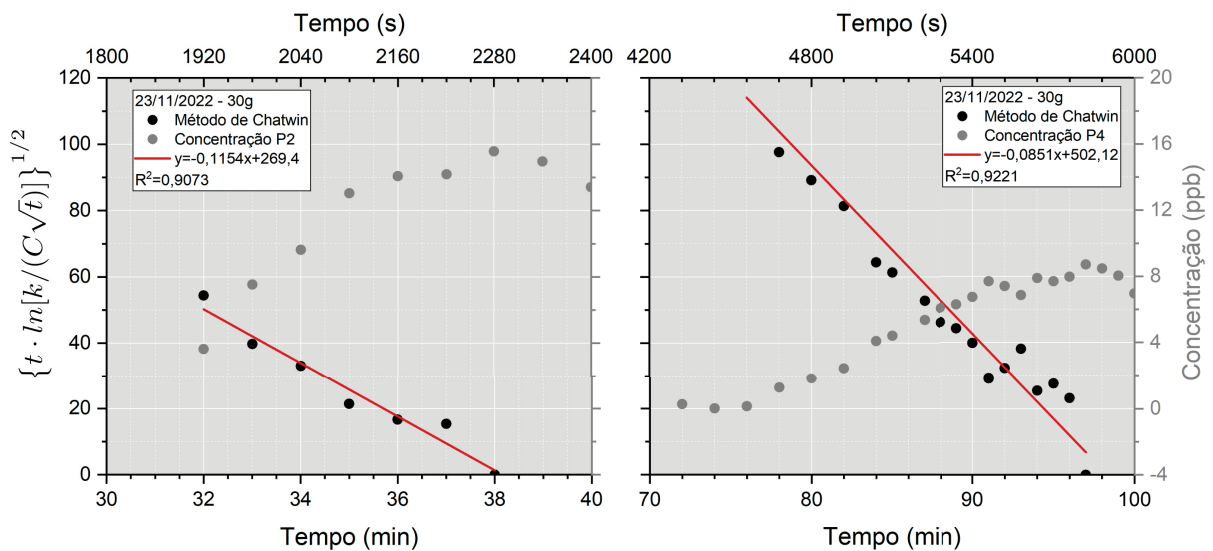


Figura 50 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 23/11/2022.

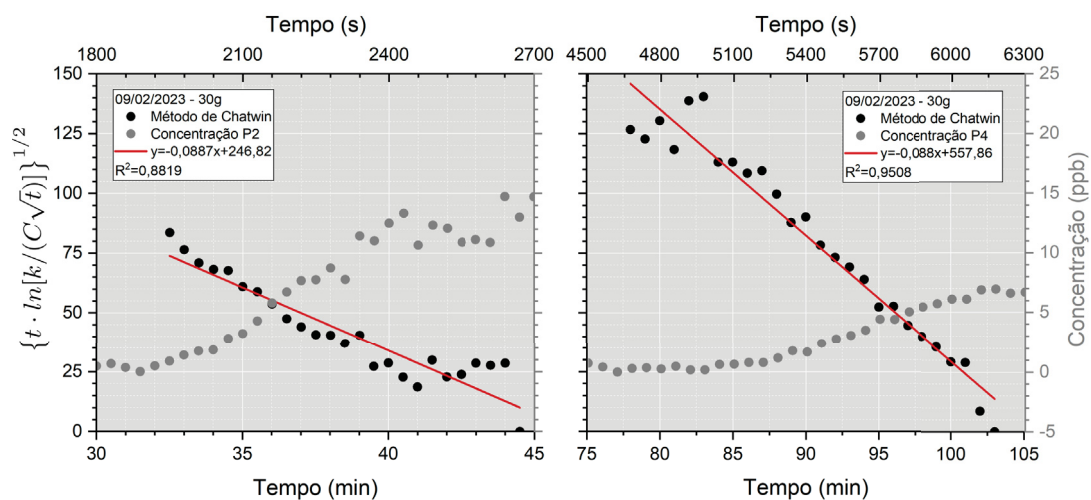


Figura 51 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 09/02/2023.

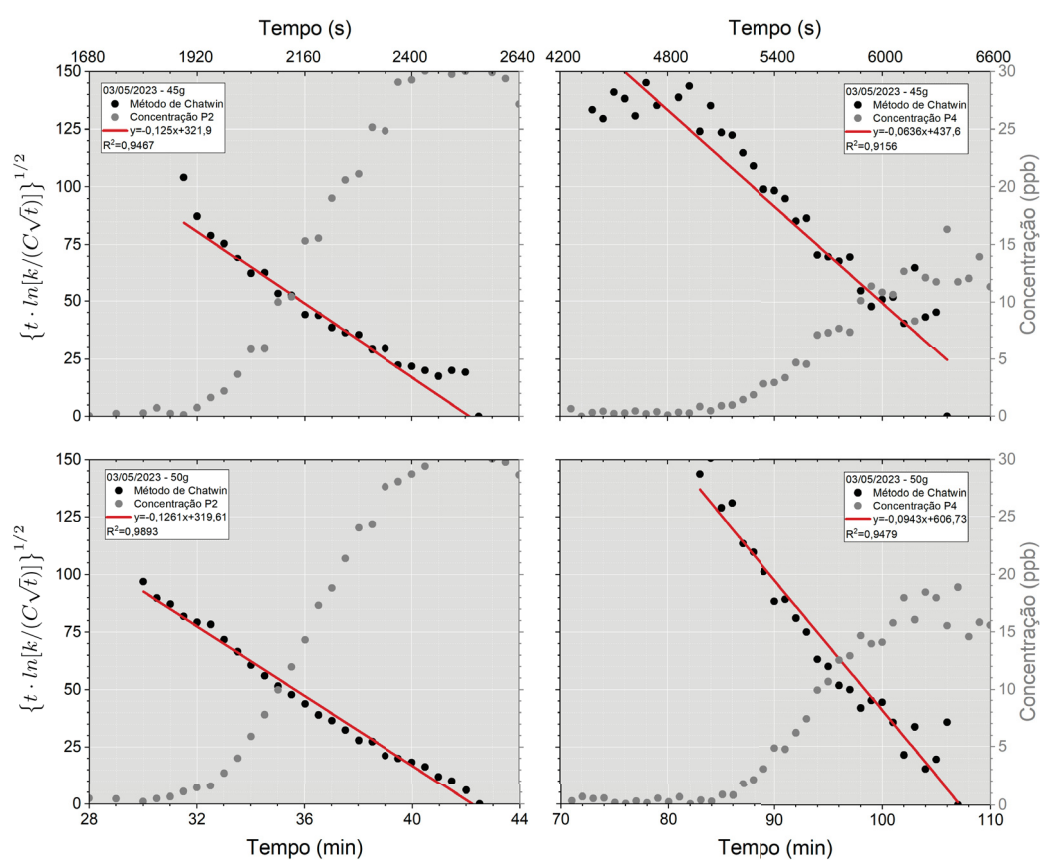


Figura 52 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 03/05/2022.

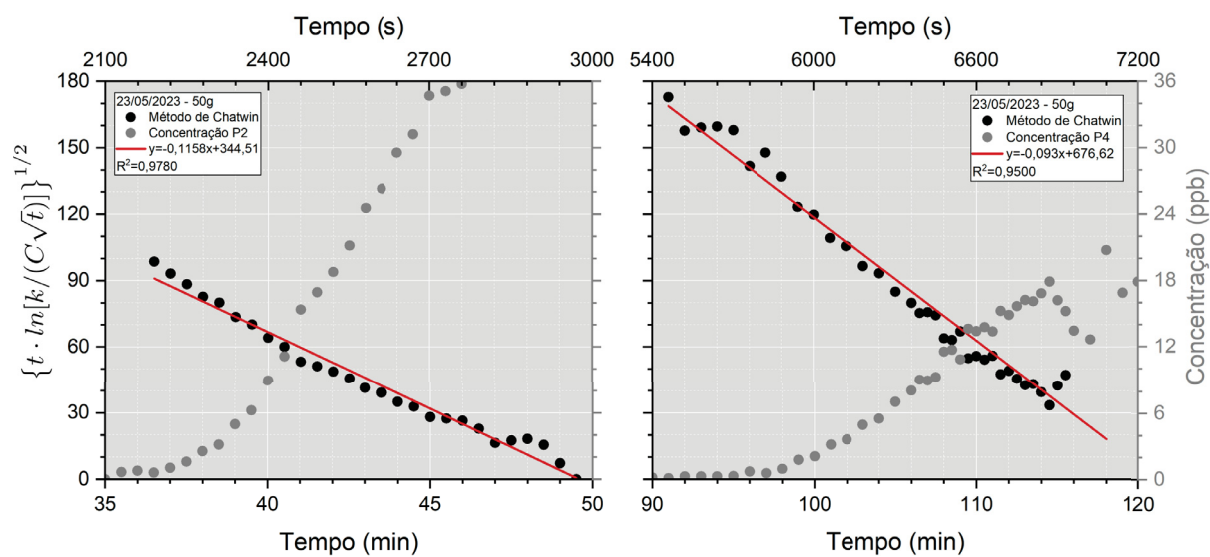


Figura 53 – Reta ajustada (Equação 2.43) para o dia 23/05/2022.