

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**COEFICIENTES DE DESOXIGENAÇÃO E DE  
REAERAÇÃO SUPERFICIAL EM TRECHOS DO  
RIO VACACAÍ MIRIM**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Thiago Augusto Formentini**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

**COEFICIENTES DE DESOXIGENAÇÃO E DE  
REAERAÇÃO SUPERFICIAL EM TRECHOS DO  
RIO VACACAÍ MIRIM**

**por**

**Thiago Augusto Formentini**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo Cauduro Gastaldini**

Santa Maria, RS, Brasil

2010

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**COEFICIENTES DE DESOXIGENAÇÃO E DE REAERAÇÃO  
SUPERFICIAL EM TRECHOS DO RIO VACACAÍ MIRIM**

elaborada por  
**Thiago Augusto Formentini**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Profª Drª Maria do Carmo Cauduro Gastaldini**  
(Presidente/Orientadora)

**Prof. Adilson Pinheiro – Ph.D. (FURB)**

**Profª Delmira Beatriz Wolff – Ph.D. (UFSM)**

Santa Maria, 30 de Novembro de 2010

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Maria Terezinha e Darci, que abdicaram de muitos dos próprios sonhos para proporcionar a educação que recebi. Agradeço a minha irmã Thamara, cuja ternura sempre me motivou.

Agradeço à minha namorada Pri, pelo amor, carinho, compreensão e acima de tudo pelo estímulo na realização deste trabalho. Te amo.

Agradeço à professora Maria do Carmo pela orientação, apoio e amizade durante todas as etapas da realização desta dissertação. Agradeço também pelo incentivo, desde o início da graduação, em meu crescimento acadêmico.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental pelos conhecimentos transmitidos, em especial à professora Eloiza e ao professor João Batista, que juntamente com a professora Maria do Carmo não mediram esforços para a aquisição dos equipamentos e produtos necessários.

Aos irmãos Marco Alésio e Daniel Frasson, pela parceria do dia-a-dia.

Agradeço à FINEP, pelos recursos do projeto de pesquisa INTEGRA, e ao CNPq, pela bolsa de apoio técnico.

Aos amigos e funcionários do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental José Astério, André Collasiol e Eliomar Pappis, pelo apoio e amizade. Ao também amigo e funcionário Alcides Sartori, pela ajuda imprescindível nos trabalhos de campo.

Aos amigos bolsistas/colegas de mestrado/mestres, Rodrigo, Diego, Bruno, Lucas, Ronaldo, Daniela, Fábio, Leandra, Mariana, Mônica, Ana Lúcia, Rafael. Obrigado pela ajuda.

Aos professores Adilson Pinheiro e Marcos Rivail. Ao Guilherme e ao Petrick, e em nome deles a toda a equipe da Universidade Regional de Blumenau (FURB) pelo suporte analítico.

Agradeço a todas as pessoas que de uma forma ou outra colaboraram para a elaboração deste trabalho.

A todos muito obrigado.

"A ignorância afirma ou nega veementemente;

A ciência duvida."

Voltaire

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **COEFICIENTES DE DESOXIGENAÇÃO E DE REAERAÇÃO SUPERFICIAL EM TRECHOS DO RIO VACACAÍ MIRIM**

AUTOR: THIAGO AUGUSTO FORMENTINI

ORIENTADORA: PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. MARIA DO CARMO CAUDURO GASTALDINI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 30 de dezembro de 2010

Esta dissertação apresenta a determinação experimental dos dois coeficientes mais importantes na modelagem do oxigênio dissolvido em corpos d'água: o coeficiente de reaeração superficial  $K_2$ , e o coeficiente de desoxigenação  $K_1$ . O coeficiente de desoxigenação foi determinado em três seções representativas da bacia em estudo, sendo uma com característica urbana, uma mista e uma rural. Três experimentos foram conduzidos, caracterizando diferentes vazões no rio Vacacaí Mirim. O coeficiente  $K_1$  foi determinado por meio da construção da curva de decaimento de oxigênio *versus* tempo, num período total de 20 dias. Os valores de  $K_1$  variaram de  $0,15 \text{ dia}^{-1}$  a  $0,27 \text{ dia}^{-1}$ . Observou-se um aumento de  $K_1$  com o aumento da vazão, nas seções de característica mista e rural, evidenciando a maior contribuição da carga orgânica de maneira difusa nessas áreas. Não foi possível observar uma variação de vazão significativa na seção de característica urbana, devido ao amortecimento do escoamento pelo reservatório situado a montante da seção. Nesta seção, possivelmente, um aumento na descarga líquida acarreta uma diminuição no valor do coeficiente de desoxigenação, já que é visível a contribuição pontual de esgoto doméstico. O coeficiente de reaeração superficial foi determinado utilizando a metodologia dos traçadores inertes, com o emprego de propano como traçador gasoso e Rodamina WT como traçador de referência. Dois experimentos foram conduzidos em dois trechos, na região de maior urbanização da bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim. No primeiro experimento, o valor de  $K_2$  foi de  $30,30 \text{ dia}^{-1}$ , para o primeiro trecho, e  $24,77 \text{ dia}^{-1}$ , para o segundo. No segundo ensaio, o  $K_2$  obtido foi de  $14,91 \text{ dia}^{-1}$  e  $12,73 \text{ dia}^{-1}$ , respectivamente. Aborda-se a respeito de outras metodologias de determinação experimental do coeficiente de reaeração, bem como sobre as equações de estimativa de  $K_2$ . O valor obtido nos ensaios foi comparado com aqueles previstos pelas principais equações presentes na literatura. O valor estimado pelas equações apresentou grande discrepância entre as mesmas, sendo que as equações mais recentes, propostas a partir da regressão de dados de  $K_2$  obtidos pela própria metodologia dos traçadores inertes, apresentaram as menores variações, entre -32,95% e 14,51%. Baseado nos resultados propôs-se uma equação para estimativa de  $K_2$  exclusiva para os trechos estudados, adaptada a partir das equações de Melching e Flores.

Palavras chave: reaeração superficial, traçadores, desoxigenação, oxigênio dissolvido.

## ABSTRACT

Master's Essay  
Post-Graduation Program in Civil Engineering  
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

### DEOXYGENATION AND REAERATION COEFFICIENTS ON VACACAÍ MIRIM RIVER REACHES

AUTHOR: THIAGO AUGUSTO FORMENTINI  
ADVISOR: DRA. MARIA DO CARMO CAUDURO GASTALDINI  
Date and Local: Santa Maria, November 30th, 2010.

This dissertation presents the experimental determination of the two most important coefficients in modeling of dissolved oxygen in water bodies: the reaeration-rate coefficient  $K_2$  and the deoxygenation coefficient  $K_1$ . The deoxygenation coefficient was determined in three representative sections of the considered basin: the first with urban characteristics, the second mixed and the third rural characteristics. Three experiments were conducted, featuring different flows in the Vacacaí Mirim River.  $K_1$  was determined by constructing the oxygen depletion versus time curve, in a 20 days period.  $K_1$  ranged from  $0.15 \text{ day}^{-1}$  to  $0.27 \text{ day}^{-1}$ . An increase in  $K_1$  value was observed due to flow increment, in mixed and rural characteristics areas, reflecting the major contribution of diffuse organic load in those areas. It was not possible to observe a significant variation of flow in the urban feature section, due to damping of the flow by the upstream reservoir. This section is considered to present a decrease in the  $K_1$  value as liquid discharge increases, since it is noticeable the sewage contribution. The reaeration-rate coefficient was determined using inert tracer technique, applying propane as gas tracer and Rhodamine WT as dye tracer. Two experiments were conducted in two reaches, both in the highest urbanization areas of the Vacacaí Mirim basin. In the first experiment,  $K_2$  value was  $30.30 \text{ day}^{-1}$  for the first reach, and  $24.77 \text{ day}^{-1}$  for the second. In the second test,  $K_2$  obtained was  $14.91 \text{ day}^{-1}$  and  $12.73 \text{ day}^{-1}$ , respectively. An approach was made about alternative methods for experimental determination of the reaeration-rate coefficient and the predictive equations of  $K_2$ . The results obtained in tests were compared with those predicted by the most important equations in literature. The predictive equations presented large discrepancy between them, and the latest formulas, derived from  $K_2$  measurements obtained by the gas tracer methods, presented the lowest variation, ranging from -32.95% to 14.51%. Based on results, an equation was proposed to estimate  $K_2$  restricted to the studied sites, adapting from the equations of Melching and Flores.

Keywords: reaeration, tracers, deoxygenation, dissolved oxygen.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Balanço de oxigênio dissolvido nos sistemas aquáticos .....	20
FIGURA 2 – Mecanismo de decomposição microbológica que ocorre em um frasco de DBO .....	23
FIGURA 3 – O efeito de diferentes velocidades de reação para o cálculo da $DBO_u$ de amostras com a mesma $DBO_5$ .....	23
FIGURA 4 – Misturamento lateral, dispersão longitudinal e variação da distribuição da concentração a jusante de uma injeção instantânea central de traçador .....	26
FIGURA 5 – Curvas $C \times t$ observadas em três verticais de uma mesma seção ( $d$ , $b$ e $f$ ), para três pontos ao longo do rio – injeção instantânea central.....	28
FIGURA 6 – Superposição das curvas de passagem de sucessivas injeções instantâneas .....	29
FIGURA 7 – Estimativa da vazão de injeção de gás propano para obtenção de um patamar de $1 \mu\text{g/L}$ .....	37
FIGURA 8 – Estimativa do volume de Rodamina WT – 20% a ser injetada instantaneamente e produzir concentrações de pico de 1 e $50 \mu\text{g/L}$ .....	38
FIGURA 9 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim .....	48
FIGURA 10 – Localização das áreas e seções para determinação de $K_1$ e $K_2$ .....	50
FIGURA 11 – Seções de estudo.....	50
FIGURA 12 – Leitura da concentração de oxigênio dissolvido e amostras no interior da incubadora .....	54
FIGURA 13 – Injeção instantânea de Rodamina WT ao lado do difusor de propano .....	55
FIGURA 14 – Cilindro de gás propano acoplado à regulador de pressão e rotâmetro .....	56
FIGURA 15 – Mangueira difusora de gás e suporte de fixação.....	56
FIGURA 16 – Fluorímetro de campo .....	57
FIGURA 17 – Esquema de amostragem de gás em água com pipeta volumétrica .....	58
FIGURA 18 – Armazenamento da amostra em frasco âmbar com septo de silicone .....	58



FIGURA 19 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 11/03/2010 – Seção D1.....	61
FIGURA 20 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 11/03/2010 – Seção D2.....	62
FIGURA 21 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 11/03/2010 – Seção D3.....	62
FIGURA 22 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 07/04/2010 – Seção D1.....	62
FIGURA 23 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 07/04/2010 – Seção D2.....	63
FIGURA 24 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 07/04/2010 – Seção D3.....	63
FIGURA 25 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 27/04/2010 – Seção D1.....	63
FIGURA 26 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 27/04/2010 – Seção D2.....	64
FIGURA 27 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 27/04/2010 – Seção D3.....	64
FIGURA 28 – Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 18/08/2010 – seção R1.....	65
FIGURA 29 – Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 10/09/2010 – seções R1 e R3.....	67
FIGURA 30 – Curvas de passagem dos traçadores: experimento 17/09/2010.....	69
FIGURA 31 – Curvas de passagem dos traçadores: experimento 05/10/2010.....	70
FIGURA 32 – Coeficientes de reaeração observados e previstos pela equação 37.....	74

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Classificação geomórfica dos escoamentos para estimativa de $k_2$ por meio da pressão sonora.....	44
--	----

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Valores Típicos de $K_1$ (base e, 20°C) .....	24
TABELA 2 – Valores Típicos de $K_1$ (base e, 20°C).....	24
TABELA 3 – Valores Típicos de $K_1$ (base e, 20°C).....	24
TABELA 4 – Dados de $K_2$ medidos experimentalmente, compilados de acordo com as características hidráulicas dos escoamentos .....	39
TABELA 5 – Equações de previsão de $K_2$ .....	41
TABELA 6 – Valores Típicos de $K_2$ (base e, 20°C) .....	42
TABELA 7 – Coordenadas geográficas das seções de estudo .....	51
TABELA 8 – Valores obtidos para $K_1$ (base e, 20°C), $DBO_5$ e $DBO_u$ em cada seção de amostragem, com a respectiva $DBO_5$ , $DBO_u$ e vazão do dia da coleta.....	61
TABELA 9 – Resultados obtidos: experimento 17/09/2010.....	68
TABELA 10 – Resultados obtidos: experimento 05/10/2010.....	70
TABELA 11 – Comparação entre os valores de $K_2$ (base e, 20°C) previstos pelas equações e observados no experimento do dia 17/09/2010 .....	72
TABELA 12 – Comparação entre os valores de $K_2$ (base e, 20°C) previstos pelas equações e observados no experimento do dia 05/10/2010 .....	73

## LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Dados experimentais do primeiro teste com o traçador Rodamina WT: 18/08/2010.....	83
APÊNDICE 2 – Dados experimentais do segundo teste com o traçador Rodamina WT: 10/09/2010.....	84
APÊNDICE 3 – Dados experimentais do primeiro ensaio de determinação do coeficiente de reaeração superficial: 17/09/2010.....	85
APÊNDICE 4 – Dados experimentais do segundo ensaio de determinação do coeficiente de reaeração superficial: 05/10/2010.....	86
APÊNDICE 5 – Dados experimentais para a construção da curva de decaimento de oxigênio dissolvido: experimento 11/03/2010.....	88
APÊNDICE 6 – Dados experimentais para a construção da curva de decaimento de oxigênio dissolvido: experimento 07/04/2010.....	89
APÊNDICE 7 – Dados experimentais para a construção da curva de decaimento de oxigênio dissolvido: experimento 27/04/2010.....	90

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\mu\text{g/L}$	Microgramas por litro
$^3\text{H}$	Trítio, radioativo
$^{85}\text{Kr}$	Criptônio 85, radioativo
C	Concentração
CT	Centro de Tecnologia
D1, D2, D3	Seções de estudo da reaeração números 1, 2 e 3
dBA	Decibéis
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DBO <sub>5</sub>	Demanda bioquímica de oxigênio de 5 dias
DBO <sub>u</sub>	Demanda bioquímica de oxigênio última, de 20 dias
e	2,7183; base dos logaritmos neperianos
<i>et al.</i>	E outros
<i>f</i>	fotoperíodo
ft <sup>3</sup> /s	Pés cúbicos por segundo
FURB	Fundação Universidade Regional de Blumenau
g	Gramas
h	Horas
<i>H</i>	Profundidade média
<i>i</i>	Declividade
$K_1$	Coefficiente de desoxigenação
$K_2$	Coefficiente de reaeração superficial
Kg	Quilogramas
$K_p$	Coefficiente de dessorção do propano
$K_T$	Coefficiente de dessorção de um traçador qualquer
<i>L</i>	Distância ou DBO
L/min	Litros por minuto
$L_t$	DBO remanescente no tempo <i>t</i>
$L_o$	Concentração de DBO carbonácea última
<i>m e j</i>	Montante e jusante
m	Metros
m/Km	Metros por quilômetro

$m/s$	Metros por segundo
$M1, Mn$	Injeção instantânea de um traçador
$m^3/s$	Metros cúbicos por segundo
$mg/L$	Miligramas por litro
$min$	Minutos
$mL$	Mililitros
$^{\circ}C$	Grau Celsius
$OD$	Oxigênio dissolvido
$P$	Pressão sonora
$Pa$	Pascal
$Q$	Vazão
$R1, R2, R3$	Seções de estudo da reaeração números 1, 2 e 3
$r^2$	coeficiente de determinação
$SI$	Seção de injeção dos traçadores
$SL$	Nível sonoro
$T$	Temperatura
$t$	Tempo
$t^*$	Tempo de mínimo déficit de oxigênio
$T_D$	Tempo de passagem de uma traçador
$T_L$	Tempo decorrido entre a injeção e o início da passagem de um traçador por uma seção
$T_P$	Tempo decorrido entre a injeção e o pico de concentração de um traçador por uma seção
$T_T$	Tempo decorrido entre a injeção e o final da passagem de um traçador por uma seção
$U$	Velocidade média
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
$Y$	DBO exercida
$\Delta h$	Diferença de cota

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>18</b>
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos .....	18
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 O balanço de oxigênio dissolvido .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 O Coeficiente de desoxigenação e a DBO última .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 O coeficiente de reaeração superficial .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 Comportamento dos traçadores nos escoamentos .....</b>	<b>26</b>
2.4.1 Princípio da superposição.....	28
<b>2.5 Determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial com o uso de traçadores .....</b>	<b>30</b>
2.5.1 Método do criptônio .....	31
2.5.2 Método do propano.....	32
2.5.3 Método do pico e método da área .....	33
2.5.4 Método do patamar.....	35
2.5.5 Estimativa da quantidade e vazão de injeção dos traçadores .....	36
<b>2.6 Valores de <math>K_2</math> obtidos utilizando propano como traçador gasoso em outros estudos.....</b>	<b>38</b>
<b>2.7 Equações de previsão do coeficiente de reaeração <math>K_2</math>.....</b>	<b>39</b>
<b>2.8 Outros métodos de determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial .....</b>	<b>42</b>
2.8.1 Estimativa de $K_2$ por meio da pressão sonora .....	43
2.8.2 Método Delta para a determinação do coeficiente de reaeração.....	45
2.8.3 Método da sonda solúvel .....	46
<b>3 ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>48</b>
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1 Determinação do coeficiente de desoxigenação.....</b>	<b>52</b>
4.1.1 Coleta das amostras .....	52
4.1.2 Análises de laboratório .....	52

<b>4.2 Determinação do coeficiente de reaeração superficial.....</b>	<b>54</b>
<b>4.3 Obtenção dos parâmetros de entrada para estimativa de <math>K_2</math> por meio das equações de previsão.....</b>	<b>59</b>
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
<b>5.1 Determinação do coeficiente de desoxigenação.....</b>	<b>60</b>
<b>5.2 Determinação do coeficiente de reaeração superficial.....</b>	<b>64</b>
5.2.1 Ensaio preliminares com o traçador Rodamina WT.....	64
5.2.2 Ensaio completos de determinação do coeficiente de reaeração.....	67
<b>5.3 Equações de previsão do coeficiente de reaeração superficial.....</b>	<b>71</b>
<b>5.4 Proposta de equação para estimativa do coeficiente de reaeração superficial nos trechos estudados.....</b>	<b>73</b>
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>75</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A quantidade de oxigênio dissolvido em um corpo d'água caracteriza-se por ser um dos principais parâmetros indicadores da qualidade da água, sendo um fator determinante para a proliferação e manutenção da vida de seres aquáticos superiores que se utilizam deste oxigênio no processo de respiração (Maia, 1996).

A poluição hídrica, contudo, está diretamente relacionada à capacidade natural do corpo receptor em se autodepurar, ou seja, a capacidade de oxidar os compostos biodegradáveis por meio da atividade respiratória dos microrganismos, que se alimentam dessa matéria orgânica, consumindo o oxigênio dissolvido (OD) da água (Costa, 2000).

preponderantes para qualquer estudo de modelagem do oxigênio dissolvido em um corpo d'água são a cinética em que a matéria orgânica é degradada, levando a um conseqüente consumo de OD, e a velocidade com que esse oxigênio é repostado, na maioria dos casos advindo preferencialmente da absorção física do oxigênio contido da atmosfera em função da movimentação turbulenta na superfície livre do escoamento.

De acordo com Stamer *et al.* (1982), avaliações confiáveis de DBO são a principal ferramenta para o projeto de estações de tratamento de água e para prever o impacto de um lançamento de esgotos em um corpo d'água. Tão importante quanto estimar o montante de OD consumido pela matéria orgânica em cinco dias, período padrão da DBO<sub>5</sub>, é conhecer a demanda total de consumo de oxigênio dessa amostra, a DBO<sub>u</sub>, e principalmente a velocidade com que esse mecanismo se processa: o coeficiente de desoxigenação  $K_1$ .

O coeficiente que mede a velocidade de absorção física do oxigênio atmosférico por um escoamento é conhecido como coeficiente de reaeração superficial,  $K_2$ . Segundo Kilpatrick *et al.* (1989), o principal uso do coeficiente de reaeração é na quantificação do processo de reaeração atmosférica para utilização em modelos de qualidade da água baseados no oxigênio dissolvido. Se o valor de  $K_2$  utilizado em um modelo de qualidade for menor que o real, o grau de tratamento da água indicado pelo modelo será maior que o necessário, podendo implicar em custos maiores e inclusive impossibilitando determinado projeto. De maneira inversa, ao utilizar um valor de  $K_2$  maior que o real, a indicação do modelo para o tratamento

será menor que a demandada pelo corpo d'água, o que pode ocasionar sérios problemas ambientais. De todas as formas, salienta-se a importância do conhecimento real das características de reaeração de um manancial para o auxílio em sua gestão e na tomada de decisão.

Conhecendo-se os mecanismos de desoxigenação e reoxigenação em um rio ou em trechos do mesmo, pode-se estimar a capacidade de assimilação do corpo receptor de um lançamento de despejos orgânicos. Da mesma forma, pode-se estimar o potencial impacto de um empreendimento instalado em determinada região de uma bacia hidrográfica, auxiliando, em última instância, na tomada de decisão por meio da utilização de modelos matemáticos de simulação da qualidade da água.

Estudos de modelagem qualitativa das águas dos rios pertencentes à bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim, realizados por Oppa, Gastaldini e Missio (2007), confirmaram a grande dependência dos parâmetros relativos às fontes e sumidouros de oxigênio nos resultados do modelo. A análise de sensibilidade indicou que o parâmetro  $K_2$  apresenta a maior sensibilidade entre os parâmetros de calibração, justificando-se aí a relevância de sua determinação experimental.

Uma vez que a reaeração atmosférica está diretamente relacionada ao déficit de oxigênio dissolvido em suas águas, ou seja, à diferença entre as concentrações de saturação e às concentrações reais existentes, o conhecimento da cinética de desoxigenação, expressa pelo coeficiente  $K_1$ , torna-se importante para o entendimento desses mecanismos.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é o estudo dos coeficientes de desoxigenação e de reaeração superficial no rio Vacacaí Mirim.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar os ensaios para determinação do coeficiente de desoxigenação ( $K_1$ ) nos trechos selecionados;
- Determinar o valor dos coeficientes de desoxigenação;
- Implementar o aparato experimental para a determinação do coeficiente de reaeração superficial ( $K_2$ );
- Realizar os ensaios de campo para determinação do coeficiente de reaeração nos trechos selecionados;
- Determinar o valor dos coeficientes de reaeração superficial empregando a metodologia dos traçadores modificada;
- Comparar os valores de  $K_2$  com os resultados obtidos pela aplicação das equações de previsão da bibliografia;
- Propor uma equação de estimativa de  $K_2$  para os trechos estudados.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 O balanço de oxigênio dissolvido

Segundo Von Sperling (2005-B), em termos ecológicos, a repercussão mais nociva da poluição de um corpo d'água por matéria orgânica é a queda nos níveis de oxigênio dissolvido, causada pela respiração dos microrganismos envolvidos na depuração dos esgotos.

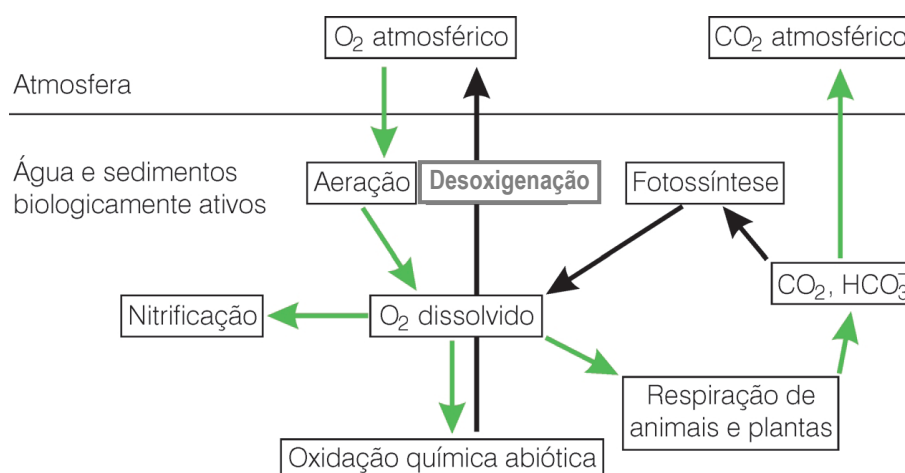
O teor de oxigênio dissolvido é um fator importante à preservação da fauna e flora aquática, além disso, tanto a poluição como a sua estabilização são medidos em termos de oxigênio dissolvido. Por isso, normalmente utilizam-se como parâmetros o OD e a DBO para a avaliação da poluição em um curso d'água. A medição do OD é simples, e o seu teor pode ser expresso em concentrações quantificáveis, e passíveis de modelagem matemática.

As águas constituem ambientes bastante pobres em oxigênio, em virtude da baixa solubilidade deste. Enquanto no ar a sua concentração é da ordem de 270 mg/L, na água, nas condições normais de temperatura e pressão, a sua concentração se reduz aproximadamente a apenas 9 mg/L. Desta forma, qualquer consumo em maior quantidade traz sensíveis repercussões quanto ao teor de oxigênio dissolvido na massa líquida.

No processo de autodepuração há um balanço entre as fontes de consumo e as fontes de produção de oxigênio. Quando a taxa de consumo é superior à taxa de produção, a concentração de oxigênio tende a decrescer, ocorrendo o inverso quando a taxa de consumo é inferior à taxa de produção (Von Sperling, 2005-B).

As principais fontes de oxigênio para a água são a atmosfera e a fotossíntese. Por outro lado, as perdas de oxigênio são causadas pelo consumo pela decomposição da matéria orgânica (oxidação), por perdas para a atmosfera, respiração de organismos aquáticos, nitrificação e oxidação química abiótica de substâncias como íons metálicos - ferro(II) e manganês(II) -, por exemplo. (Fiorucci e Benedetti Filho, 2005)

Os principais fenômenos que interagem no balanço do oxigênio dissolvido em um curso d'água encontram-se apresentados na Figura 1.



**Figura 1 – Balanço de oxigênio dissolvido nos sistemas aquáticos; os processos acelerados ou aumentados pela descarga de materiais orgânicos são indicados por setas verdes** (Fonte: Fiorucci e Benedetti Filho, 2005)

## 2.2 O Coeficiente de desoxigenação e a DBO última

Dados de DBO confiáveis não são apenas essenciais como são a principal ferramenta para um correto planejamento do funcionamento de uma estação de tratamento de esgotos aeróbia, assim como para a avaliação do impacto provocado pelo despejo de material orgânico em corpos d'água naturais.

No entanto, as informações retiradas do teste padrão de DBO<sub>5</sub>, no qual se incuba a amostra por um período de cinco dias, sob condições padrão, subtraindo-se a leitura do oxigênio dissolvido ao final do período estipulado daquela obtida no início do teste, não são suficientes para a tomada de decisão ou para a previsão do impacto gerado por uma carga poluidora em um escoamento natural. A relação entre a causa e o efeito não pode ser obtida.

As informações necessárias podem ser obtidas por meio da determinação da demanda bioquímica carbonácea de oxigênio última (DBO<sub>u</sub>) e a velocidade específica na qual a reação de decomposição da matéria orgânica ocorre: o coeficiente de desoxigenação  $K_1$  (Stamer *et al.*, 1982).

A DBO é tradicionalmente abordada como uma reação de 1<sup>a</sup> ordem, na qual a velocidade de consumo da matéria orgânica carbonácea é proporcional a quantidade de matéria ainda restante na amostra. Assim, essa velocidade será maior num primeiro momento, onde a carga orgânica é alta, mas tende a decair

progressivamente, à medida que a matéria orgânica é consumida. A relação pode ser expressa por:

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (1)$$

onde  $dL/dt$  é a velocidade de consumo de oxigênio dissolvido (ou DBO exercida) por unidade de tempo (mg/L.dia);  $K_1$  é a constante de reação da DBO ( $\text{dia}^{-1}$ ) e  $L$  a DBO última (apenas carbonácea) (mg/L).

Fazendo a integração, obtém-se:

$$L_t = L_0 e^{-K_1 t} \quad (2)$$

onde  $L_0$  é a DBO final ou oxigênio total consumido na reação (mg/L) e  $L_t$  é a DBO remanescente no tempo  $t$  (mg/L).

A quantidade de oxigênio consumida durante um período do teste de DBO ( $Y$ ) é:

$$Y = L_0 - L_t \quad (3)$$

Assim,

$$Y = L_0(1 - e^{-K_1 t}) \quad (4)$$

ou usando base 10:

$$Y = L_0(1 - 10^{-K_{10} t}) \quad (5)$$

A relação entre  $K_1$  na base 10 e  $K_1$  na base  $e$  é:

$$K_e = 2,303 K_{10} \quad (6)$$

A velocidade de reação da DBO varia de acordo com a quantidade e a natureza da matéria orgânica presente, a temperatura e o tipo de microorganismos presentes na água.

Segundo Von Sperling (2005-B), a temperatura tem uma grande influência no metabolismo microbiano, afetando, por conseguinte, as cinéticas de conversão da matéria orgânica. A relação empírica entre a temperatura e a velocidade de desoxigenação pode ser expressa da seguinte forma:

$$K_{1,T} = K_{1,20} \theta^{(T-20)} \quad (7)$$

sendo  $K_{1,T}$  o valor de  $K_1$  a uma temperatura qualquer ( $\text{dia}^{-1}$ );  $K_{1,20}$  o valor de  $K_1$  a  $20^\circ\text{C}$  ( $\text{dia}^{-1}$ );  $T$  a temperatura da água ( $^\circ\text{C}$ ); e  $\theta$  o coeficiente de temperatura. Um valor usual para  $\theta$ , segundo Von Sperling (2005-B), é 1,047.

Ao aplicar-se esse valor a  $\theta$  verifica-se que  $K_1$  aumenta 4,7% a cada acréscimo de  $1^\circ\text{C}$  na temperatura. Esse fato, no entanto, não altera o valor de  $L_o$ , apenas faz com que esse estado de oxidação total da matéria orgânica carbonácea presente seja atingido mais rapidamente.

O fenômeno da desoxigenação pode ser ilustrado levando em consideração a maneira com que os microorganismos presentes utilizam a matéria orgânica presente em uma amostra. Primeiramente, ocorre uma rápida reação de síntese (transformação de carboidratos de alto peso molecular em moléculas menores), onde a concentração de oxigênio dissolvido cai abruptamente, devido à alta concentração orgânica do meio, característica principal de esgotos ou efluentes brutos. Num segundo momento, verifica-se um metabolismo endógeno mais lento (figura 2). Em efluentes tratados, a maior parte da matéria orgânica foi removida e o mecanismo processa-se mais lentamente, resultando num consumo de oxigênio mais lento e conseqüentemente num menor valor de  $K_1$ . De maneira oposta, quanto maior a velocidade de reação, devido às altas concentrações de matéria orgânica assimilável pelos microorganismos, maior o valor de  $K_1$  (Gray, 2004).

É possível que amostras com diferentes valores de  $K_1$  apresentem a mesma  $\text{DBO}_5$ . Na figura 3 observa-se o efeito, na  $\text{DBO}_u$ , de diferentes velocidades de reação para amostras que apresentam a mesma  $\text{DBO}_5$ , ilustrando a importância do conhecimento do mecanismo da degradação da matéria orgânica para a tomada de decisão ou para a previsão do impacto gerado por uma carga poluidora em um escoamento natural.

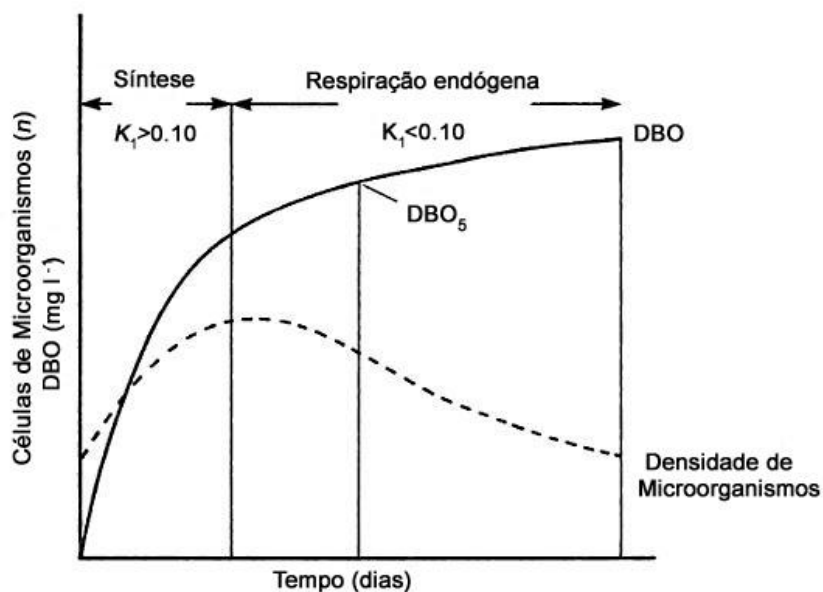


Figura 2 – Mecanismo de decomposição microbiana que ocorre em um frasco de DBO (adaptado de Gray, 2004)

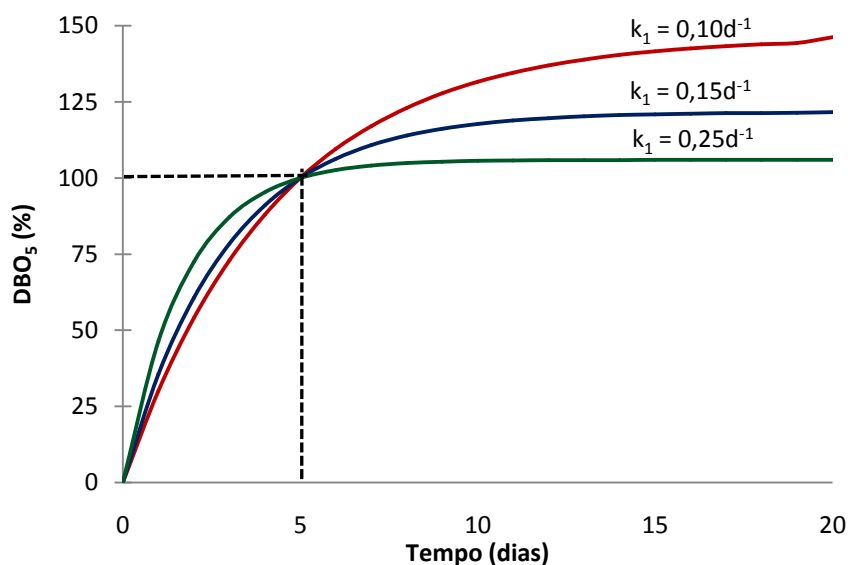


Figura 3 – O efeito de diferentes velocidades de reação para o cálculo da  $DBO_u$  de amostras com a mesma  $DBO_5$  (adaptado de Gray, 2004)

Diferentes autores apresentam classificações relativamente distintas para enquadrar os valores do coeficiente de desoxigenação de acordo com o grau de poluição da amostra. Como exemplo, Thomman e Mueller; Kielly; Davies e Masten (1987; 1997; 2004; apud CHIN, 2006) classificam os valores típicos de  $K_1$  como mostrado na tabela 1.



**Tabela 1 – Valores Típicos de  $K_1$  (base e, 20°C)**

Tipo de Água	$K_1$ (dia <sup>-1</sup> )
Água residuária não tratada	0.35 - 0.7
Água residuária tratada	0.10 - 0.35
Rio poluído	0.10 - 0.25
Rio não poluído	< 0.05

Fonte: Thomman e Mueller; Kielly; Davies e Masten (1987; 1997; 2004; apud CHIN, 2006)

Gray (2004) sugere valores típicos da velocidade de consumo de DBO a 20°C de acordo com a tabela 2.

**Tabela 2 – Valores Típicos de  $K_1$  (base e, 20°C)**

Corpo d'água	$K_1$ (dia <sup>-1</sup> )
Rios de baixa poluição	0.04 – 0.08
Efluentes tratados biologicamente	0.06 – 0.10
Efluentes parcialmente tratados	0.12 – 0.22
Resíduos não tratados	0.15 – 0.28

Fonte: Modificado de Gray (2004)

Von Sperling (2005-B) apresenta os valores típicos de  $K_1$ , para diferentes tipos de esgotos, efluentes e cursos d'água de acordo com a tabela 3.

**Tabela 3 – Valores Típicos de  $K_1$  (base e, 20°C)**

Origem	$K_1$ (dia <sup>-1</sup> )
Esgoto bruto concentrado	0,35 - 0,45
Esgoto bruto de baixa concentração	0,30 - 0,40
Efluente primário	0,30 - 0,40
Efluente secundário	0,12 - 0,24
Curso d'água com águas limpas	0,08 - 0,20

Fonte: Von Sperling (2005-B)

## 2.3 O coeficiente de reaeração superficial

Reaeração é a transferência de gás que ocorre na fronteira entre a superfície da água em escoamento e o ar atmosférico. A absorção do oxigênio atmosférico pela água é controlada pela fina camada de água na superfície do escoamento. Baseado em experimentos em tanques sob agitação, a dessorção de gases entre a interface ar-água pode ser considerada uma equação de primeira ordem cujo mecanismo é descrito pela equação 1:

$$\frac{dC}{dt} = -KC \quad (8)$$

onde  $dC/dt$  é a velocidade de troca na concentração de gás por unidade de tempo ( $\mu\text{g/L.dia}$ );  $K$  é o coeficiente de dessorção do gás na água ( $\text{dia}^{-1}$ ); e  $C$  é a concentração do gás dissolvido ( $\mu\text{g/L}$ ).

A equação pode ser reescrita para o caso do oxigênio ou outro gás similar estar sendo absorvido, tornando o sinal de  $K$  positivo, indicando que o fluxo gasoso está ocorrendo na direção inversa. O processo de absorção é conduzido pelo déficit de saturação existente no meio em que o gás está se movendo.

O coeficiente de absorção ou dessorção  $K$ , da equação 8, é definido como:

$$K = \frac{K_L}{H} \quad (9)$$

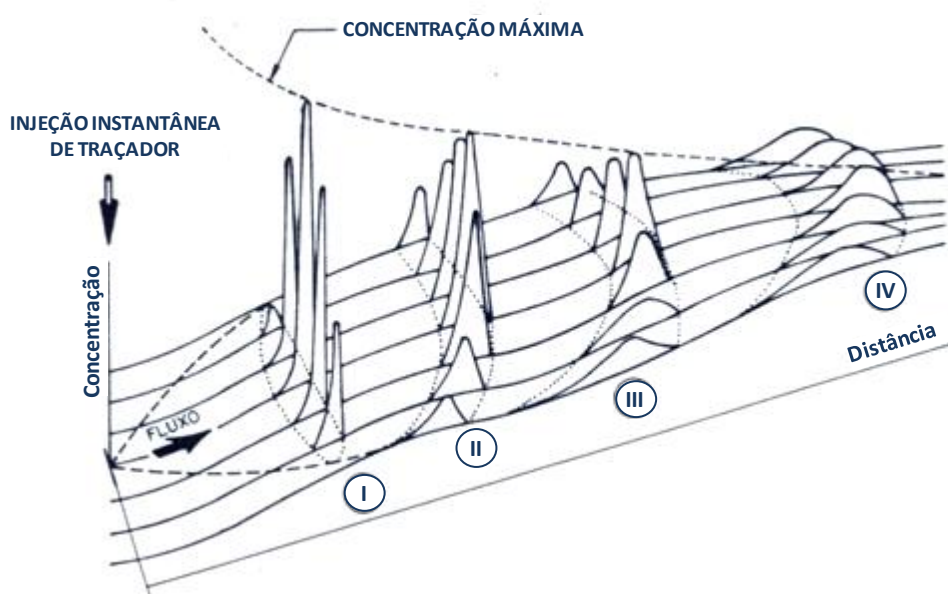
onde  $K_L$  é o coeficiente que expressa a velocidade de absorção ou dessorção através do filme superficial ( $\text{m/dia}$ ); e  $H$  é a profundidade média do corpo d'água ( $\text{m}$ ).

Nota-se que a equação 8 trata o processo de absorção ou dessorção, que só ocorre na superfície da água, como equivalente a uma troca de primeira ordem, que ocorre em todos os pontos da coluna d'água. Já o coeficiente do filme superficial, na equação 9, é um termo mais importante que representa a cinética de transferência através do filme superficial, e não da coluna d'água como um todo.

## 2.4 Comportamento dos traçadores nos escoamentos

De acordo com Gleizer (1992), os traçadores usados em aplicações hidrológicas são solúveis em água, com grande capacidade de diluição e têm comportamento similar ao da água. Quando introduzidos no escoamento os traçadores apresentam a mesma dispersão e diluição que a massa d'água marcada.

Na figura 4 está ilustrado o comportamento de um traçador solúvel, em termos de dispersão, ao longo do rio após uma injeção central instantânea.



**Figura 4 – Misturamento lateral, dispersão longitudinal e variação da distribuição da concentração a jusante de uma injeção instantânea central de traçador**  
(adaptado de Gleizer, 1992)

A seguir são mostradas as características da nuvem traçadora ao longo de seu percurso no corpo d'água, de acordo com o misturamento:

- Ponto I: O misturamento vertical já foi completado, isto é, a concentração de traçador é a mesma em qualquer ponto de uma mesma vertical, no mesmo instante de tempo;
- Ponto II: O misturamento lateral ainda não foi completado, isto é, a massa de traçador em cada faixa é diferente, as curvas de concentração *versus* tempo não possuem as mesmas áreas;
- Ponto III: Este ponto é geralmente denominado “distância de bom misturamento”, pois nesta ocasião, embora as curvas  $C$  *versus*  $t$  possam

ter formas distintas, as áreas sob cada curva são idênticas, indicando que o misturamento lateral já foi completado e a dispersão passa a ser considerada unidimensional;

- Ponto IV: As concentrações de pico tornam-se cada vez mais próximas e, conseqüentemente, as formas das curvas de passagem também. Com a distância, a atenuação do pico de concentração e a duração da nuvem traçadora tornam-se cada vez maiores.

A descrição dos pontos acima explicita a importância de se fazer a coleta das amostras de traçador em várias verticais caso a distância do posto de amostragem não seja suficiente para atingir a chamada “distância de bom misturamento”, onde se considera uniforme a distribuição da nuvem traçadora ao longo da seção.

O modo convencional de ilustrar a passagem de uma massa de traçador em uma seção do rio é construir a curva concentração *versus* tempo ( $C \times t$ ), denominada “curva de passagem”. O tempo de passagem de uma nuvem traçadora resultante de uma injeção instantânea varia de acordo com a distância ao ponto de injeção assim como a posição lateral em uma mesma seção, devido à dispersão lateral e longitudinal.

Na figura 5 estão apresentadas as curvas de passagem, para uma injeção instantânea central de traçador, observadas nos pontos de baixa mistura (distância muito curta em relação à injeção), ótima mistura (distância de bom misturamento) e longa distância. Além disso, mostra o perfil de concentrações em diferentes verticais ( $d$ ,  $b$  e  $f$ ) na mesma seção.

Para se obter a concentração total de traçador que atinge determinada seção, deve-se observar a passagem total da nuvem traçadora. Caso a coleta seja realizada em verticais muito próximas às margens, devido à menor velocidade e conseqüente maior dispersão longitudinal, o tempo de passagem da nuvem ( $T_d$ ) é muito longo, resultando em uma dificuldade experimental (Kilpatrick *et al.*, 1989).

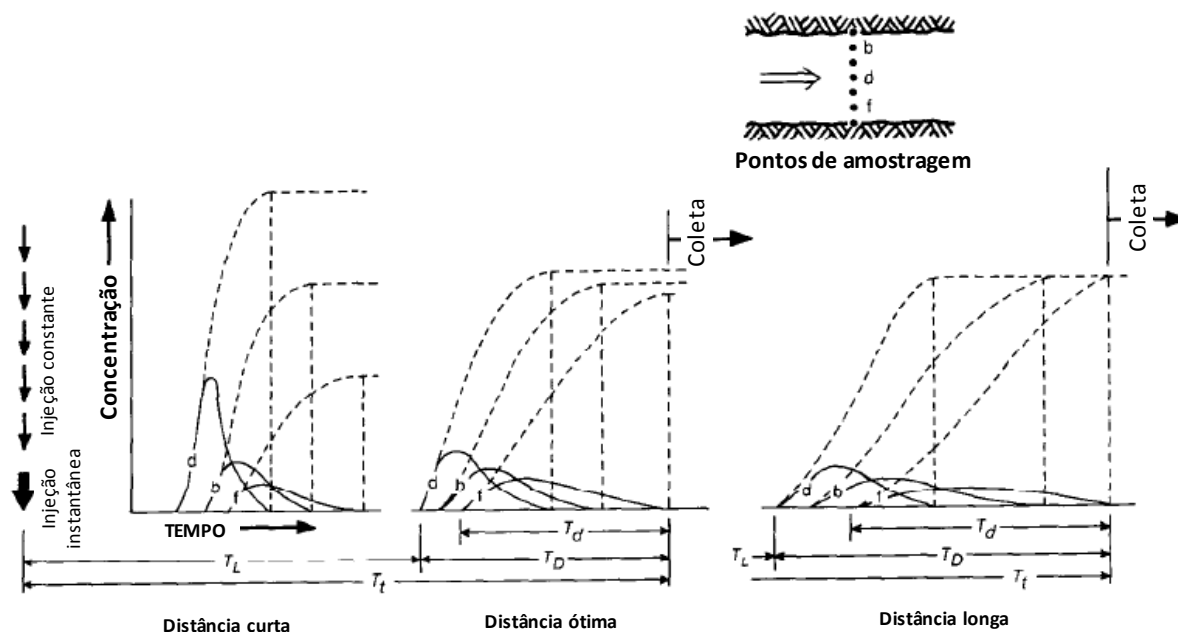


Figura 5 – Curvas  $C \times t$  observadas em três verticais de uma mesma seção ( $d$ ,  $b$  e  $f$ ), para três pontos ao longo do rio – injeção instantânea central (adaptado de Gleizer, 1992)

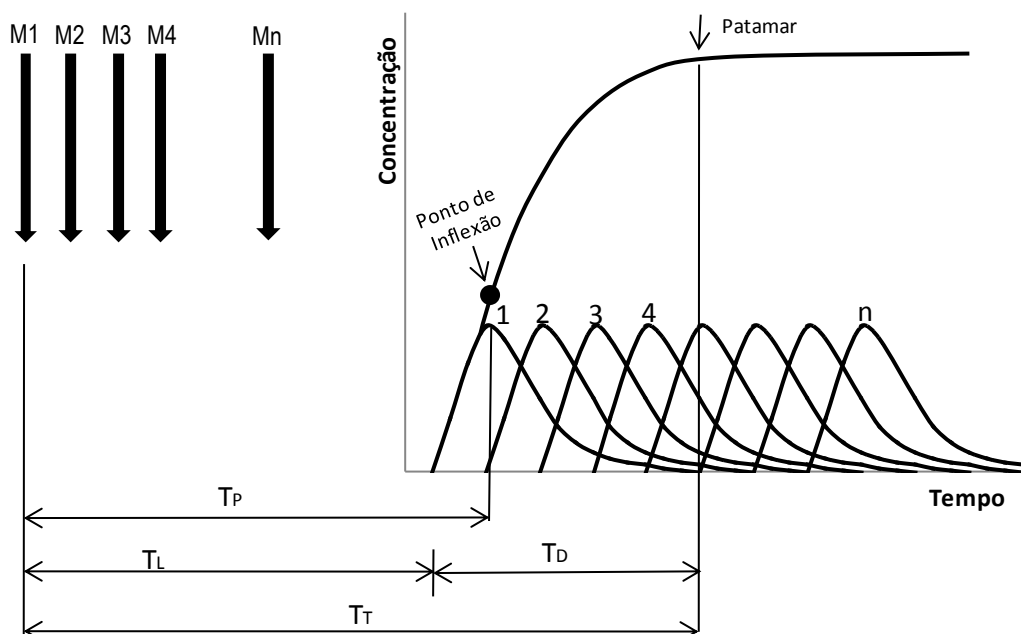
#### 2.4.1 Princípio da superposição

Para o caso de uma injeção de traçador contínua, a um fluxo constante, a curva de passagem teórica pode ser construída por meio da superposição de várias curvas de passagem de uma série de injeções instantâneas sucessivas, usando o princípio da superposição.

Na figura 6, o traçado contínuo representa a passagem do traçador correspondente à injeção  $M1$ .  $T_L$  (do inglês, *Leading edge*) corresponde ao tempo decorrido até o início da passagem de  $M1$  pela seção de estudo e  $T_T$  (do inglês, *Trailing edge*) é o final da curva de resposta da injeção  $M1$ .

Considerando o escoamento estável, uma série de pequenas injeções pontuais espaçadas de intervalos de tempo curtos e constantes (na verdade, uma injeção contínua), será observada uma resposta que corresponderá à soma de todas as injeções ( $M1 + M2 + M3$ , etc). O gráfico de resposta apresentará um crescimento correspondente à  $M1$  até que o tempo de pico de  $M1$  ( $T_P$ ) seja atingido. Esse ponto é denominado “ponto de inflexão” e a partir dele a concentração do gás traçador passa a crescer em uma velocidade progressivamente mais lenta, até atingir um patamar, exatamente no tempo em que se observa o final do gráfico de resposta da injeção instantânea  $M1$ . Após o patamar ser atingido, caso não mudem as condições

de escoamento e injeção do gás, a concentração observada em um determinado ponto da seção deixa de apresentar variação, devido ao equilíbrio estabelecido entre a constante injeção e a passagem das nuvens discretas (Kilpatrick *et al.*, 1989).



**Figura 6 – Superposição das curvas de passagem de sucessivas injeções instantâneas**  
(adaptado de Gleizer, 1992)

Analisando novamente a figura 5, percebe-se que para uma distância muito curta, o patamar é atingido em diferentes concentrações lateralmente, o que comprova o misturamento pobre que ocorre nestas seções. A coleta neste local deve ser evitada. Já no ponto de bom misturamento, o patamar tende a ser atingido nas mesmas concentrações, independente da vertical adotada. Para que isso aconteça, a injeção deve ter um tempo de duração no mínimo igual ao maior tempo de passagem de uma nuvem traçadora individual na seção, que no caso da figura 2 corresponde à vertical  $f$ .

Uma vez que a curva de passagem fica cada vez mais longa à medida que a distância do ponto de injeção aumenta, o tempo mínimo de injeção do traçador para que o patamar seja atingido é ditado pela curva de passagem de maior duração da seção mais a jusante em estudo.

## 2.5 Determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial com o uso de traçadores

A técnica dos traçadores para a determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial –  $K_2$  – baseia-se no princípio da relação constante entre a velocidade de absorção de oxigênio atmosférico pela água e a velocidade de dessorção de um gás traçador injetado na mesma amostra de interesse, independentemente das condições de agitação e temperatura (Rathbun e Grant, 1978). Desta forma:

$$K_2 = K_T / R \quad (10)$$

onde  $K_2$  é o coeficiente de absorção de oxigênio, ou coeficiente de reaeração ( $\text{dia}^{-1}$ );  $K_T$  é o coeficiente de dessorção do traçador gasoso ( $\text{dia}^{-1}$ ); e  $R$  é a razão obtida entre os coeficientes.

Embora a relação entre a velocidade de dessorção do traçador gasoso e a velocidade de absorção do oxigênio atmosférico pela água deva permanecer constante numa faixa de temperatura de trabalho, tanto a solubilidade do oxigênio quanto o coeficiente de reaeração são funções da temperatura e, portanto, comparações só são válidas se ajustadas para uma temperatura de referência especificada (Hampson e Coffin, 1989).

Elmore e West (1961, apud HAMPSON E COFFIN, 1989) determinaram a relação dos coeficientes de reaeração ajustados para uma temperatura padrão de 20°C, de acordo com a equação:

$$K_{2,20} = K_2(1,0241)^{20-T} \quad (11)$$

onde  $K_{2,20}$  é o coeficiente de reaeração ajustado a 20°C ( $\text{dia}^{-1}$ );  $K_2$  é coeficiente de reaeração medido à temperatura  $T$  ( $\text{dia}^{-1}$ ); e  $T$  é a temperatura em que foi realizado o experimento (°C).

O procedimento para obtenção do coeficiente  $K_2$  consiste na injeção simultânea de um traçador gasoso juntamente com um traçador conservativo de referência. O traçador gasoso tem por objetivo simular a troca gasosa, que ocorre na

interface líquido-gás, sendo sua perda para a atmosfera proporcional à absorção de oxigênio pelo corpo d'água. Já o traçador conservativo permite o ajuste da concentração do gás em qualquer ponto de coleta, descontando os efeitos de dispersão e diluição que ocorrem, respectivamente, pelo aumento da distância em relação ao ponto de injeção e ao incremento de vazão ao longo do trecho em estudo.

Amostras são obtidas em várias seções de coleta a jusante do ponto de injeção dos traçadores e a concentração do traçador gasoso, assim como a diluição e a dispersão, podem ser determinados (Rathbun e Grant, 1978).

### 2.5.1 Método do criptônio

A técnica do traçador radioativo consiste na injeção simultânea de um traçador gasoso radioativo,  $^{85}\text{Kr}$ ; um traçador conservativo, para a correção dos efeitos de dispersão e diluição,  $^3\text{H}$ ; e um traçador fluorescente para o acompanhamento da passagem da nuvem traçadora, Rodamina WT. Por tratar-se de uma injeção instantânea, no mesmo ponto temporal e espacial, a primeira seção de amostragem pode ser numa distância imediatamente após a injeção. Considera-se a mistura instantânea dos traçadores (Rathbun e Grant, 1978).

De acordo com Roldão (1990), os dois conceitos que são a base para a determinação experimental do coeficiente de reaeração  $K_2$  com o emprego de um traçador gasoso radioativo ( $^{85}\text{Kr}$ ) e um traçador de referência ( $^3\text{H}$ ) são expressos matematicamente de acordo com as seguintes equações:

$$K_{Kr} = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\left(\frac{C_{Kr}}{C_H}\right)_j}{\left(\frac{C_{Kr}}{C_H}\right)_m} \quad (12)$$

onde  $K_{Kr}$  é o coeficiente de desorção do  $^{85}\text{Kr}$  ( $\text{dia}^{-1}$ );  $\Delta t$  é o tempo de viagem do traçador entre as estações de amostragem (dias);  $C_{Kr}/C_H$  é a razão entre a concentração de  $^{85}\text{Kr}$  e  $^3\text{H}$  na estação de amostragem;  $j$  e  $m$  são as seções de jusante e montante do trecho.



A relação entre o coeficiente de dessorção do criptônio radioativo e o coeficiente de reoxigenação é:

$$\frac{K_{Kr}}{K_2} = 0,83 \pm 0,04 \quad (13)$$

De acordo com a equação 12, a velocidade de dessorção de uma nuvem móvel de  $^{85}\text{Kr}$  injetada instantaneamente em um rio é descrita por uma reação com cinética de primeira ordem, na qual foi implementada uma correção, que leva em conta a dispersão. Essa correção é baseada assumindo-se que as características de dispersão de um gás nobre são as mesmas do traçador conservativo (ou de referência)  $^3\text{H}$ , que é injetado simultaneamente.

A equação 13, obtida experimentalmente por Tsivoglou *et al.* (1965), permite a correlação entre os resultados obtidos no caso do criptônio para os desejados para o oxigênio ( $K_2$ ). Essa relação pode ser considerada constante para uma faixa de temperatura entre 10 e 30°C e não é afetada pela turbulência ou poluentes.

### 2.5.2 Método do propano

Com o intuito de reduzir a utilização de material radioativo em corpos d'água naturais, principalmente nas situações onde o uso de radiotraçadores é restrito, Rathbun *et al.* (1975) desenvolveram um método experimental de determinação de  $K_2$  com uso de traçadores inertes. Esta técnica, denominada inicialmente como "técnica de traçadores modificada", é uma derivação da técnica com traçadores radioativos. Consiste basicamente na injeção de um gás hidrocarboneto de leve peso molecular – propano – e a utilização de Rodamina WT como traçador de referência.

Devido à baixa solubilidade de gases hidrocarbonetos em água, a injeção do propano não pode ser feita instantaneamente como o  $^{85}\text{Kr}$ . Geralmente esta injeção é feita durante algumas horas, borbulhando o gás através de um difusor. Para o método do propano, as equações 10 e 12 são também válidas e aplicáveis. Dependendo da duração da injeção e da distância dos postos de medição, a

observação das curvas de passagem pode seguir uma distribuição gaussiana ou atingir um patamar.

Como na técnica radioativa, considera-se a perda do traçador gasoso inerte apenas para a atmosfera. A razão entre a velocidade de dessorção do propano e o  $K_2$ , determinados experimentalmente por Rathbun *et al.* (1975) a 20, 25 e 30°C, e diferentes condições de agitação, similares à equação 13 é:

$$\frac{K_P}{K_2} = 0,72 \quad (14)$$

onde  $K_P$  é a velocidade de dessorção do propano.

### 2.5.3 Método do pico e método da área

Os dois métodos comuns à metodologia de determinação do coeficiente de reaeração tanto pela técnica dos traçadores radioativos quanto pela técnica dos traçadores modificada são o “método do pico” e o “método da área”. O “método do pico”, originalmente proposto por Tsvoglou *et al.* (1968, apud HAMPSON E COFFIN, 1989) utiliza o traçador de referência para a correção da concentração de pico do gás traçador por dispersão. O “método da área” utiliza a massa total de gás traçador que passa pelas seções de monitoramento para o cálculo do coeficiente de dessorção e, conseqüentemente, de reaeração. No último caso, o traçador de referência serve apenas como indicador da passagem da nuvem traçadora (Hampson e Coffin, 1989).

O cálculo do coeficiente de dessorção pelo método da concentração de pico é como segue:

$$K_T = \frac{1}{t_j - t_m} \ln \frac{\left(\frac{C_T}{C_D}\right)_j}{\left(\frac{C_T}{C_D}\right)_m} \quad (15)$$

sendo  $K_T$  o coeficiente de dessorção na base e para o gás traçador ( $\text{dia}^{-1}$ );  $t$  o tempo de viagem até o pico de concentração (dias);  $C_T$  e  $C_D$  as concentrações de pico para

o gás traçador e o traçador de dispersão-diluição, respectivamente ( $\mu\text{g/L}$ );  $m$  e  $j$  as seções de montante e jusante, respectivamente.

Pelo fato de a Rodamina WT, utilizada como traçador de referência e corante no método dos traçadores modificado, não ser um traçador totalmente conservativo, faz-se necessária a medição da quantidade total deste traçador que passa pelas seções de coleta. Calcula-se a perda do traçador de referência para que a quantidade observada na seção de estudo seja corrigida e utilizada na equação 15 (Grant e Skavroneck, 1980).

Hren (1984) apresenta o fator de correção para o caso da utilização do método da concentração de pico:

$$J = \frac{Q_m A_m}{Q_j A_j} \quad (16)$$

onde  $Q$  é a vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e  $A$  é a área sob a curva concentração x tempo do traçador ( $\mu\text{g.L}^{-1}.\text{dia}$ );  $m$  e  $j$  as seções de montante e jusante, respectivamente. Este termo de correção  $J$  deve ser multiplicado pelo termo  $C_D$  (concentração do traçador de referência) na seção de jusante.

No método da área (ou massa total) o uso de informações do traçador de referência não se faz necessário, já que se mede toda a área da curva de passagem do traçador gasoso. Neste caso, a Rodamina WT é utilizada apenas para acompanhar a passagem da massa traçadora e auxiliar no momento da coleta (Grant e Skavroneck, 1980). Utiliza-se a seguinte equação para determinar o  $K_T$  pelo método da área:

$$K_T = \frac{1}{t_j - t_m} \ln \frac{A_m Q_m}{A_j Q_j} \quad (17)$$

onde  $A_m$  e  $A_j$  são as áreas sob as curvas de concentração x tempo nas seções de montante e jusante ( $\mu\text{g.L}^{-1}.\text{dia}$ ), respectivamente;  $Q_m$  e  $Q_j$  são as vazões nas seções de montante e jusante ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), respectivamente;  $t_j$  e  $t_m$  o tempo de viagem dos centróides das curvas de passagem do traçador nas seções de jusante e montante,

respectivamente. Kilpatrick *et al.* (1989) apresentam a integração numérica para obtenção do centróide de uma curva de passagem de um traçador.

Gleizer (1992), no entanto, salienta a dificuldade na realização do cálculo pelo método da área, principalmente para rios de maior vazão, devido à dificuldade experimental na determinação de concentrações muito baixas de propano em água (regiões próximas do início e do final da curva de passagem). Este fato torna o método do pico mais fácil e confiável uma vez que são necessárias determinações das concentrações de propano apenas nas regiões máximas das curvas de passagem (ou na região do patamar).

É importante destacar que em ambos os métodos a injeção do traçador gasoso e do traçador conservativo devem seguir exatamente os mesmos critérios temporais. Para o caso específico do propano e Rodamina WT, devido à baixa solubilidade do gás, ambos os traçadores devem ser injetados a um fluxo constante por um período de tempo geralmente de algumas horas para obtenção de concentrações mensuráveis nos pontos mais a jusante.

#### 2.5.4 Método do patamar

Desenvolvido por Yotsukura (1983), o método do patamar para a determinação experimental do coeficiente de reoxigenação possui algumas diferenças significativas em relação às metodologias anteriores.

De acordo com o descrito no item 2.4.1, a sobreposição de diversas curvas de passagem subseqüentes de um traçador (na verdade uma injeção contínua) leva a obtenção de um patamar, assim que a primeira curva teórica passa completamente pela seção de amostragem. Segundo Kilpatrick *et al.* (1989), neste caso, se a injeção do gás for longa o bastante, a dispersão longitudinal deixa de ser uma variável na concentração, apenas a diluição pelo acréscimo de vazão reduzirá a altura do patamar além da redução pela dessorção. Teoricamente, basta apenas uma amostragem após atingir-se o patamar para obter sua concentração constante.

Assim, determina-se o coeficiente de dessorção por:

$$K_T = \frac{1}{t_j - t_m} \ln \frac{\bar{C}_m Q_m}{\bar{C}_j Q_j} \quad (18)$$

sendo  $\bar{C}_m$  e  $\bar{C}_j$  as concentrações dos patamares de gás nas seções de montante e jusante, respectivamente ( $\mu\text{g/L}$ );  $Q_m$  e  $Q_j$  as vazões nas seções de montante e jusante ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), respectivamente;  $t_j$  e  $t_m$  o tempo de viagem dos centróides das curvas de passagem do traçador de referência nas seções de jusante e montante, respectivamente.

Devido ao fato da dispersão longitudinal se tornar desprezível, é desnecessário o uso do traçador de referência para a correção das perdas. Passa a ser desejável uma injeção instantânea do traçador conservativo, mesmo com o gás sendo injetado continuamente. Este procedimento facilita a determinação do tempo de viagem dos traçadores, indica com precisão o tempo mínimo de injeção do traçador gasoso (pela determinação do tempo de passagem da nuvem de traçador de referência na seção mais a jusante), além de fornecer o momento exato em que o patamar de gás está estabelecido (ao final da passagem do traçador conservativo em cada seção).

#### 2.5.5 Estimativa da quantidade e vazão de injeção dos traçadores

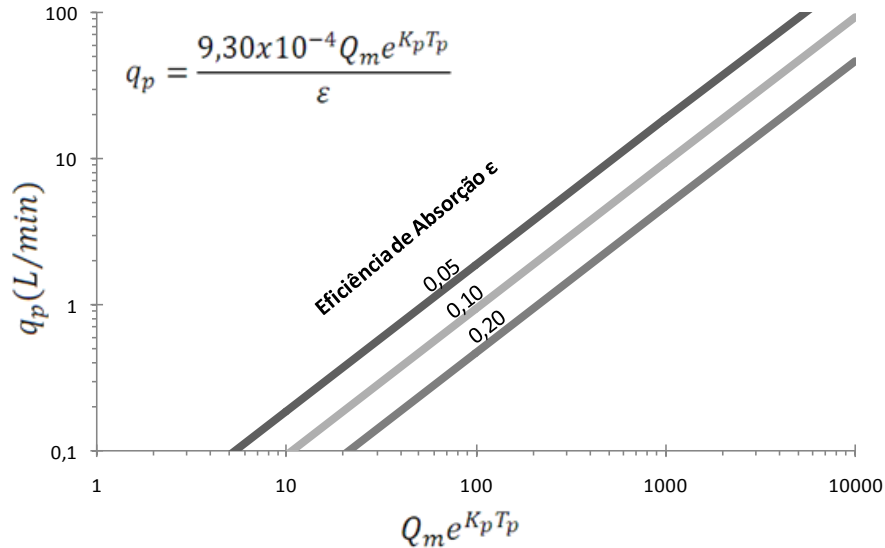
Segundo Kilpatrick *et al.* (1989), foi demonstrado por Rathbun *et al.* (1987) que a vazão de injeção do gás propano necessária para produzir um patamar na seção mais a jusante de  $1 \mu\text{g/L}$  pode ser relacionada à eficiência do difusor, à vazão do escoamento e à dessorção de primeira ordem do propano pela seguinte equação:

$$q_p = \frac{9,30 \times 10^{-4} Q_m e^{K_p t_p}}{\varepsilon} \quad (19)$$

onde  $q_p$  é a vazão de injeção constante do gás ( $\text{L/min}$ );  $Q_m$  é a vazão máxima do trecho, geralmente na seção mais a jusante ( $\text{ft}^3/\text{s}$ );  $e$  é uma constante, 2,72;  $t_p$  é o tempo de pico na seção mais a jusante (h);  $K_p$  é o coeficiente de dessorção do propano ( $\text{h}^{-1}$ ), a  $20^\circ\text{C}$ ; e  $\varepsilon$  é a eficiência de absorção.

Na figura 7 apresenta-se o gráfico correspondente à equação 19 para três diferentes eficiências de absorção. A eficiência de absorção deve ser primeiramente estimada, e caso confirme-se experimentalmente, passa-se a utilizá-la como referência. Aconselha-se estimar a eficiência no mínimo valor possível, para evitar

que a concentração de gás seja zero na seção mais a jusante, em um primeiro momento.



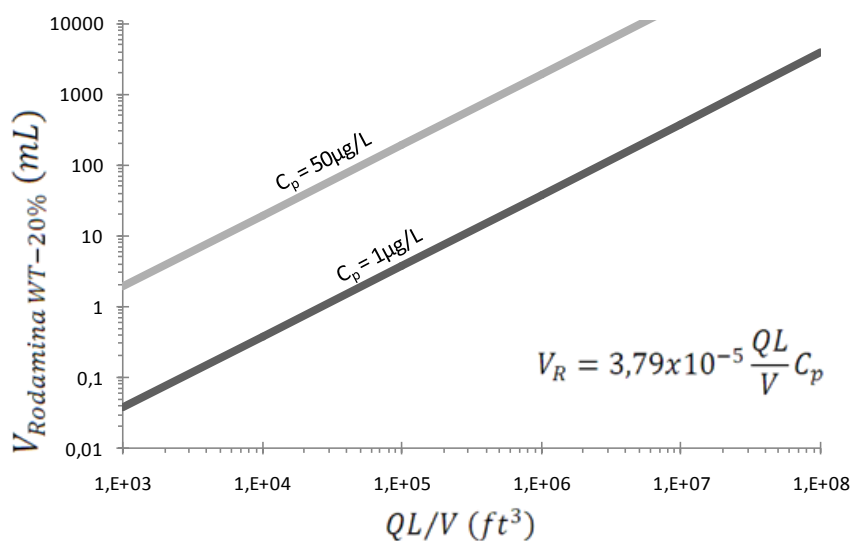
**Figura 7 – Estimativa da vazão de injeção de gás propano para obtenção de um patamar de 1  $\mu\text{g/L}$  (adaptado de Kilpatrick *et al.*, 1989)**

Analogamente, a concentração de pico da Rodamina WT também pode ser estimada, segundo a equação:

$$V_R = 3,79 \times 10^{-5} \frac{QL}{V} C_p \quad (20)$$

Onde  $V_R$  é o volume de Rodamina WT – 20% (mL);  $Q$  é a vazão na seção mais a jusante ( $\text{ft}^3/\text{s}$ );  $L$  é a distância da seção mais a jusante (m);  $V$  é a velocidade média do escoamento (m/s); e  $C_p$  é a concentração de pico no ponto de amostragem mais a jusante ( $\mu\text{g/L}$ ).

Da mesma forma é apresentado na figura 8 o método gráfico para estimar o volume de Rodamina WT a ser injetado instantaneamente e que produza uma concentração de pico de 1  $\mu\text{g/L}$  ou 50  $\mu\text{g/L}$  na seção de amostragem mais a jusante. Kilpatrick *et al.* (1989) recomendam uma concentração de pico mínima de 10  $\mu\text{g/L}$  nesta seção, no entanto a quantidade deste traçador pode ser maior de acordo com a conveniência.



**Figura 8 – Estimativa do volume de Rodamina WT – 20% a ser injetada instantaneamente e produzir concentrações de pico de 1 e 50  $\mu g/L$  (adaptado de Kilpatrick *et al.*, 1989)**

## 2.6 Valores de $K_2$ obtidos utilizando propano como traçador gasoso em outros estudos

Na tabela 4 apresentam-se os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de reaeração superficial com o emprego da metodologia de determinação com utilização de propano como gás traçador, retirados de Rathbun e Grant (1978), Grant e Skavroneck (1980), Hren (1984), Gleizer (1992), e Barbosa Júnior (1997).

Segundo Melching e Flores (1999), até 1996 o banco de dados da *U.S. Geological Survey* já era composto por valores de  $K_2$  para 493 trechos independentes, em 166 rios de 23 estados dos Estados Unidos. A tabela 4, portanto, apresenta uma compilação elaborada com o intuito de apresentar valores de  $K_2$  para escoamentos em que uma ou mais condições hidráulicas assemelham-se com as características dos trechos em estudo nesse trabalho, que serão abordadas na descrição da área em estudo (capítulo 3) e nos resultados (capítulo 5).

**Tabela 4 – Dados de  $K_2$  medidos experimentalmente, compilados de acordo com as características hidráulicas dos escoamentos**

	Trecho	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Declividade (m/Km)	Velocidade (m/s)	Profundidade (m)	$K_2$ (dia <sup>-1</sup> )
Black Earth Creek	-	1,10	0,80	0,34	0,06 - 0,9	9,64
Madison Effluent	-	1,4 - 2	0,72	0,34 - 0,38	0,6 - 1,2	5,83
Bonner Brach	1	0,05	2,81	0,05	0,2 - 0,3	8,14
	2	0,05	2,31	0,07	0,2 - 0,3	8,98
Halfway Creek	1	0,19	1,58	0,29	0,1 - 0,2	13,10
	2	0,19	1,48	0,31	0,1 - 0,2	22,80
Raccoon Creek at Newark	-	1,55	2,11	0,48	0,23	15,05
Silver Creek at Doylestown	-	0,08	4,60	0,09	0,24	11,08
Sandusky River at Tiffin	-	1,64	2,81	0,21	0,12	7,70
Little Beaver Creek	-	0,61	1,72	0,24	0,31	9,32
Rocky River	-	0,92	1,33	0,21	0,15	11,65
Little Miami River	-	3,53	0,80	0,20	0,61	5,70
Rio Paraíba do Sul	1	300	0,3	0,65	2,75	0,92
	2	300	0,3	0,62	3,0	0,66
Ribeirão Laranja Azeda	-	0,52	-	0,32	0,36	15,26
Ribeirão do Feijão	-	2,96	-	0,36	0,61	20,40
Rio Jacaré-Guaçu	-	11,30	-	0,48	1,25	4,00
Ribeirão das Caldas	-	3,10	-	0,65	0,45	8,35

Fonte: Rathbun e Grant (1978), Grant e Skavroneck (1980), Hren (1984), Gleizer (1992) e Barbosa Júnior (1997)

## 2.7 Equações de previsão do coeficiente de reaeração $K_2$

Grant e Skavroneck (1980) e Gleizer (1992) ressaltam a importância da escolha de uma equação adequada para a previsão do coeficiente de reaeração de um trecho em estudo para um resultado satisfatório no modelo a ser aplicado.

O problema consiste na grande discrepância entre os valores obtidos entre as diversas equações propostas. Isto se deve principalmente ao fato de que estas equações foram propostas para faixas bastante reduzidas de valores para os parâmetros hidrodinâmicos. Qualquer aplicação de uma equação de previsão de  $K_2$  para valores fora da faixa proposta pode levar a grandes erros no resultado obtido, comprometendo o trabalho de modelagem.

Von Sperling (2005-A) realizou uma comparação entre algumas das equações mais empregadas na modelagem de oxigênio dissolvido, que utilizam como parâmetros de entrada a velocidade e a profundidade do rio. São elas: O'Connor e



Dobbins (1958), Churchill *et al.* (1962) e Owens *et al.* (1964), que segundo o autor possuem faixas de aplicabilidade complementares. Segundo o autor, “observa-se que os valores das três equações se complementam razoavelmente bem, sem descontinuidades expressivas nas zonas limites de cada faixa de aplicabilidade”.

O autor ainda avalia a proposta de Tsvoglou e Wallace (1972), um par de equações “desenvolvidas especificamente para cursos d’água pequenos e rasos, e que mostraram serem as mais precisas para estas condições”. São também apresentadas as equações de Melching e Flores (1999). As equações citadas neste parágrafo levam em consideração a velocidade e a declividade do trecho em estudo, e as equações de Melching e Flores ainda consideram a descarga líquida.

Von Sperling (2005-A) ressalta que em qualquer caso pode-se obter valores de  $K_2$  bastante elevados, inclusive superiores a  $100 \text{ dia}^{-1}$ , valor máximo considerado pelo modelo de simulação QUAL2E. Segundo este autor, a avaliação experimental dos coeficientes, principalmente para corpos d’água rasos, é fundamental, dada a grande incerteza gerada pelas equações e a alta sensibilidade ao parâmetro de reaeração dos modelos de oxigênio dissolvido.

Melching e Flores (1999) salientam os problemas encontrados na literatura com as equações de previsão do coeficiente de reaeração:

1. A maioria das equações de estimativa de  $K_2$  na literatura foi derivada de conjuntos relativamente pequenos de dados de laboratório ou de campo, e para um grupo relativamente localizado de escoamentos. Wilson e Macleod (1974) aplicaram 16 equações de estimativa de  $K_2$  (oito equações empíricas, utilizando a velocidade e a profundidade; e oito equações incluindo um termo de dissipação de energia) para estimar valores de  $K_2$  para um grande número de medições de campo e de laboratório (482 medições para as equações empíricas e 382 medições para as equações de dissipação de energia). Os autores encontraram que cada equação fornece estimativas precisas para os dados a partir dos quais a equação foi desenvolvida originalmente, enquanto que as estimativas foram relativamente pobres para quase todos os outros dados.
2. A maioria das equações de estimativa de  $K_2$  na literatura desenvolvidas utilizando dados de campo foi derivada de avaliações de  $K_2$  obtidas pelos métodos do balanço de OD ou perturbação do equilíbrio. Considerando-se os erros na medição de vários elementos desses métodos, Bennett e Rathbun (1972) estimaram que o erro relativo padrão esperado para essas metodologias é de 65 e 115%, respectivamente. Assim, os dados em que estas equações são baseadas incluem erros potencialmente elevados. Os métodos baseados em traçadores gasosos têm apresentado precisão na ordem de 10-25% (Tsvoglou *et al.*, 1968; Rathbun e Grant, 1978; Grant e Skavroneck, 1980; Melching, 1998). No entanto, relativamente poucas equações na literatura foram obtidas a partir de dados obtidos com traçadores gasosos [por exemplo, Tsvoglou e Wallace (1972), Hren (1984) Parker e Gay (1987), Cleveland (1989), e Parker e DeSimone (1992)].

Desta forma, uma das propostas deste trabalho é a comparação entre os valores obtidos experimentalmente para  $K_2$  e os valores advindos das diversas

equações de previsão disponíveis. Uma vez identificadas as equações que melhor se adaptam ao trecho em estudo, tem-se maior confiabilidade na adoção de valores para diferentes condições de escoamento no rio.

Na tabela 5 apresentam-se as equações anteriormente citadas, com suas respectivas faixas de aplicação. Em todos os casos o coeficiente de reaeração é expresso na base e, tendo como unidade  $\text{dia}^{-1}$ . Todos os valores são corrigidos para 20° C utilizando a equação 11.

**Tabela 5 – Equações de previsão de  $K_2$**

Pesquisador	Equação	Faixa de aplicação aproximada	Equação
O'Connor & Dobbins (1958) <sup>(1)</sup>	$3,73 U^{0,5} \cdot H^{1,5}$	$0,6\text{m} \leq H < 4,0\text{m}$ $0,05\text{m/s} \leq U < 0,8 \text{ m/s}$	(21)
Churchill <i>et al.</i> (1962) <sup>(2)</sup>	$5,0 U^{0,97} \cdot H^{1,67}$	$0,6\text{m} \leq H < 4,0\text{m}$ $0,8\text{m/s} \leq U < 1,5 \text{ m/s}$	(22)
Owens <i>et al.</i> (1964) <sup>(3)</sup>	$5,3 U^{0,67} \cdot H^{1,85}$	$0,1\text{m} \leq H < 0,6\text{m}$ $0,05\text{m/s} \leq U < 1,5 \text{ m/s}$	(23)
Langbein e Durum (1967) <sup>(4)</sup>	$5,13 U \cdot H^{1,33}$	*Não informado	(24)
Tsivoglou e Wallace (1972)	$31,6 U \cdot (1000 i)$ $15,4 U \cdot (1000 i)$	$0,03\text{m}^3/\text{s} < Q < 0,3\text{m}^3/\text{s}$ $0,3 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 8,5\text{m}^3/\text{s}$	(25 e 26)
Tsivoglou e Neal (1976)	$2,64 (\Delta h/T)$ $8,66 (\Delta h/T)$	$0,03 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 0,3\text{m}^3/\text{s}$ $0,7 \text{ m}^3/\text{s} < Q < \sim 200\text{m}^3/\text{s}$	(27 e 28)
Parker e Gay (1987)	$312,85 H^{0,176}$ $U^{0,355} \cdot i^{0,438}$	$0,1\text{m} < H < 2,0\text{m}$ $0,05\text{m/s} < U < 0,7\text{m/s}$	(29)
Smoot (1988) <sup>(5)</sup>	$543 i^{0,6236}$ $U^{0,5325} \cdot H^{0,7258}$	*Não informado	(30)
Melching e Flores (1999)	$517 (U \cdot i)^{0,524} \cdot Q^{-0,242}$ $596 (U \cdot i)^{0,528} \cdot Q^{-0,136}$	$Q < 0,556 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q > 0,556 \text{ m}^3/\text{s}$	(31 e 32)

$U$  = velocidade média no trecho (m/s);  $H$  = profundidade média (m);  $i$  = declividade (m/m);  $\Delta h$  = diferença de cota entre os pontos de montante e jusante (m);  $T$  = tempo de viagem (h);  $Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Fonte: (1), (2) e (3): Von Sperling (2005-A); (4):Oppa (2007); (5): Jha *et al.* (2001).

Na tabela 6 mostram-se os valores típicos do coeficiente de reaeração superficial, levando em consideração uma classificação ampla e generalista dos corpos d'água. Von Sperling (2005-A) salienta que os valores tabelados geralmente subestimam os valores obtidos experimentalmente ou pela aplicação das equações de estimativa do coeficiente de reaeração. A discrepância entre os valores tabelados e aqueles obtidos por meio de ensaios de campo fica visível quando se compara, por exemplo, os resultados de  $K_2$  obtidos por Rathbun e Grant (1978), Grant e Skavroneck (1980), Hren (1984), Gleizer (1992) e Barbosa Júnior (1997), contidos na tabela 4, com os dados sugeridos pela tabela 6.

**Tabela 6 – Valores Típicos de  $K_2$  (base e, 20°C)**

Corpo d'água	$K_2(\text{dia}^{-1})$	
	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 baixa velocidade normal	0,46	0,69
Rios rápidos	0,69	1,15
Corredeiras e quedas d'água	>1,15	>1,61

Fonte: Tchobanoglous e Schroeder (1985, apud CHIN, 2006); Fair *et al.*; Arceivala (1973; 1981, apud VON SPERLING, 2005-B)

## 2.8 Outros métodos de determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial

Apesar de ser considerado o método mais preciso para determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial, a técnica dos traçadores apresenta como desvantagem a necessidade de um aparato experimental sofisticado e uma numerosa equipe de trabalho, implicando em um custo elevado. Com o intuito de reduzir as dificuldades experimentais, estudos têm sido publicados com a proposta de metodologias alternativas para a determinação de  $K_2$ . As principais propostas são apresentadas a seguir.

### 2.8.1 Estimativa de $K_2$ por meio da pressão sonora

Morse *et al.* (2007) propuseram um método comparativo, pouco oneroso e de rápida resposta para estimar o coeficiente  $K_2$ , baseado na hipótese de que existe uma relação confiável entre a pressão sonora média (ruído) de um trecho de água em escoamento com o coeficiente de reaeração, uma vez que ambos são fortemente dependentes da turbulência. Também foi considerada a hipótese de um aumento na pressão sonora com o aumento da cota, novamente atribuída ao aumento da turbulência gerado pela elevação na cota e conseqüentemente na vazão.

Os valores de pressão sonora foram expressos transformando as leituras do aparelho medidor de nível de pressão sonora, usualmente expressas em Decibéis, para Pascal, utilizando-se a seguinte relação:

$$P = P_0 [10^{(SL/20)}] \quad (33)$$

onde  $P_0 = 2 \times 10^{-5}$  Pa e  $SL =$  nível sonoro (dBA).

Para cada avaliação, foram medidos o comprimento, o nível sonoro e o ruído de *background* em cada trecho de característica geomórfica distinta dentro de um trecho mais amplo em estudo. Esses dados foram utilizados para computar a pressão sonora de cada trecho característico e ponderá-los de acordo com o a fração do comprimento total do trecho que a característica geomórfica representa. A classificação geomórfica dos escoamentos foi feita em: *pools*, *runs*, *chutes*, *riffles*, *cascades*, de acordo com o quadro 1.

Os autores encontraram uma relação linear significativa entre os dados obtidos de pressão sonora ponderada e o coeficiente de reaeração medido utilizando a bem estabelecida técnica de dessorção do traçador gasoso propano. O valor do coeficiente de determinação ficou em 0,94, considerado satisfatório, já que o coeficiente de reaeração variou entre zero e  $300 \text{ dia}^{-1}$ , para análises feitas em três anos distintos.

Característica geomórfica	Características superficiais
<i>Pools</i>	Água transparente, superfície vítrea
<i>Runs</i>	Movimentos superficiais irregulares e aleatórios; freqüentemente ondulada; alta probabilidade de formação de turbilhões
<i>Chutes</i>	Padrão de choque cruzado ou formação em V; traços de “água branca” podem aparecer; possibilidade de formação de turbilhões
<i>Riffles</i>	Sem padrão de ondas regulares; mais que traços de “água branca”, porém menos que 30% da superfície coberta por “água branca”; substrato altamente influente, e com freqüência emerge à superfície
<i>Cascades</i>	Mais que 30% da superfície coberta por “água branca”

**Quadro 1 – Classificação geomórfica dos escoamentos para estimativa de  $K_2$  por meio da pressão sonora** (adaptado de Morse *et al.*, 2007)

A concordância entre as medidas de pressão sonora e cota variou significativamente para diferentes trechos do mesmo rio, sugerindo a dependência de outros fatores geomórficos e características físicas. De um modo geral, o aumento na cota gerou aumento nos níveis de pressão sonora, devido ao aumento na turbulência.

Por tratar-se de uma proposta nova, ainda há bastante a ser desenvolvido e testado. Os primeiros resultados foram satisfatórios à medida que comprovaram a relação existente entre o coeficiente de reaeração e os níveis de pressão sonora. Até que seja estabelecida uma relação teórica confiável entre os processos específicos de turbulência e pressão sonora, experimentos com gases traçadores serão necessários para fins de calibração. Assim, os autores sugerem que a técnica seja encarada como um complemento à técnica dos traçadores gasosos e não, por hora, uma substituição.

Se a relação entre os valores de pressão sonora ponderada e o coeficiente de reaeração for conhecida para diferentes vazões, há a possibilidade da criação de curvas de reaeração, possibilitando a medição da reaeração em intervalos de tempos comparáveis à leitura de OD e temperatura, por exemplo.

### 2.8.2 Método Delta para a determinação do coeficiente de reaeração

Trata-se de um método originalmente proposto por Chapra e Di Toro (1991), a partir de uma proposta de Di Toro (1981), que utilizou um procedimento orientado graficamente para estimar a velocidade fotossintética baseado na variação diária de oxigênio dissolvido num corpo d'água.

O método Delta baseia-se na estimativa da reaeração superficial, produção primária e respiração basicamente por meio de medições diurnas do oxigênio dissolvido, utilizando três características desta curva para obtenção dos resultados. O tempo de déficit mínimo de oxigênio (relativo ao meio-dia solar) é usado para estimar a velocidade de reaeração. Uma vez obtido o coeficiente de reaeração, a variação de déficit  $\Delta$  é utilizada para prever a produção fotossintética. Finalmente, o déficit médio pode ser utilizado em conjunto com as velocidades de reaeração e produção para computar a respiração. A função de Chapra e Di Toro (1991) possui forma transcendental implícita, não permitindo uma expressão analítica simples. Por isso, foram avaliadas numericamente e os resultados apresentados na forma de gráficos.

Para simplificar a abordagem, McBride e Chapra (2005) fizeram uma proposta a qual chamaram de “método delta aproximado”, evitando a necessidade de solução numérica dos gráficos propostos originalmente por Chapra e Di Toro. Trata-se de uma aproximação que utiliza a relação entre parâmetros do modelo original e manipulação de equações para construção de curvas semelhantes. A solução encontrada é:

$$K_a = 7,5 \left( \frac{5,3\eta - \phi}{\eta\phi} \right)^{0,85} \quad (34)$$

onde

$$\eta = \left( \frac{f}{14} \right)^{0,75} \quad (35)$$

$\eta$  = fator de correção do fotoperíodo (adimensional);

$f$  = duração do fotoperíodo (h);

$\phi = t^* - f/2$  = tempo entre o mínimo déficit de oxigênio e o meio-dia solar (h).

McBride e Chapra (2005) obtiveram valores muito semelhantes aos encontrados por Chapra e Di Toro (1991) no método delta tradicional, porém com a limitação de seu modelo ser adequado apenas para escoamentos com coeficiente de reaeração baixo a moderado ( $K_2 < 10 \text{ dia}^{-1}$ ) e fotoperíodos moderados (10 – 14 h). Segundo os autores, esta limitação é puramente matemática, uma vez que não foi encontrada uma equação de forma simples que se adaptasse a curva original.

O método delta aproximado possui a notoriedade de ser um método de simples aplicação, especialmente por necessitar de apenas uma seção para realização das medições. Incertezas na estimativa da reaeração podem ser compensadas por outros ajustes dentro do próprio método, que ainda leva em consideração a determinação da produção primária de oxigênio e a respiração, de modo a manter fixos os valores de déficit de oxigênio.

Não há nenhum tipo de alusão à comparação com outros métodos experimentais de determinação de  $K_2$ , desencorajando que seja utilizado puramente para este fim, sem levar em consideração a inter-relação entre os parâmetros produção primária e respiração. Apesar da facilidade de obtenção e tratamento dos dados, não apresenta característica de medição em tempo real, já que o perfil diário de OD deve ser analisado.

### 2.8.3 Método da sonda solúvel

Originalmente descrito por Giorgetti e Giansanti (1983, apud BICUDO e JAMES, 1991), o método da sonda solúvel baseia-se no mesmo princípio que o método indireto de determinação do coeficiente de reaeração superficial pela pressão sonora, ou seja, a correlação entre dois parâmetros que são funções diretas da movimentação turbulenta da água em escoamento. Neste caso, o fator que se relaciona com a reaeração é a velocidade de dissolução de uma pastilha fina de ácido benzóico.

Bicudo e James (1991) trataram de identificar os principais fatores que controlam os processos de reaeração superficial e dissolução. Para um sistema sólido-líquido, particularmente a dissolução e distribuição de um sólido em um líquido sob agitação, considera-se os seguintes fatores como principais:

- a) A agitação do líquido em contato com a superfície sólida;

- b) A temperatura, que afeta a cinética da reação;
- c) O coeficiente de difusão do sólido para um determinado líquido;
- d) A concentração do sólido dissolvido já em solução;
- e) A natureza química do sólido e do líquido.

Para os estudos experimentais, Bicudo e James utilizaram um canal circular, proporcionando uma ampla variedade de condições de agitação, pela modificação da profundidade e da potência de circulação da bomba. Além disso, padrões de rugosidade foram adicionados às paredes do canal. As pastilhas de ácido benzóico foram preparadas por compressão em um molde metálico de 6,5 cm de diâmetro e 0,5 cm de espessura e depois fixadas em uma bóia de polipropileno sobre a água. O coeficiente de reaeração superficial foi avaliado pelo método dos traçadores modificado.

Embora os autores não tenham considerado a correlação entre a reaeração atmosférica e a dissolução de um sólido em água o principal objetivo do trabalho, e sim a descrição dos processos que controlam a dissolução, uma forte correlação entre estes parâmetros foi encontrada ( $r^2 = 0,957$ ).

No entanto, ao contrário da simples relação que é obtida entre a velocidade de fuga do gás propano e a velocidade de penetração do gás oxigênio através da superfície líquida, para o método dos traçadores, a relação entre o coeficiente de transferência de oxigênio e a velocidade de dissolução de um sólido em água não é constante nem independente das condições de turbulência e misturamento. Essa relação é fortemente controlada pela velocidade do escoamento e a turbulência dentro do sistema.

Apesar das limitações citadas, os autores destacam o baixo custo do procedimento e a possibilidade da realização de testes em escoamentos em regimes não unidirecionais.

Costa (2000) verificou a linearidade dos dados de variação de massa das sondas de ácido oxálico em função do tempo, para experimentos de laboratório e de campo. Porém, os dados de campo estão transladados em relação aos laboratoriais, sugerindo a existência de um coeficiente multiplicativo entre os conjuntos de dados.

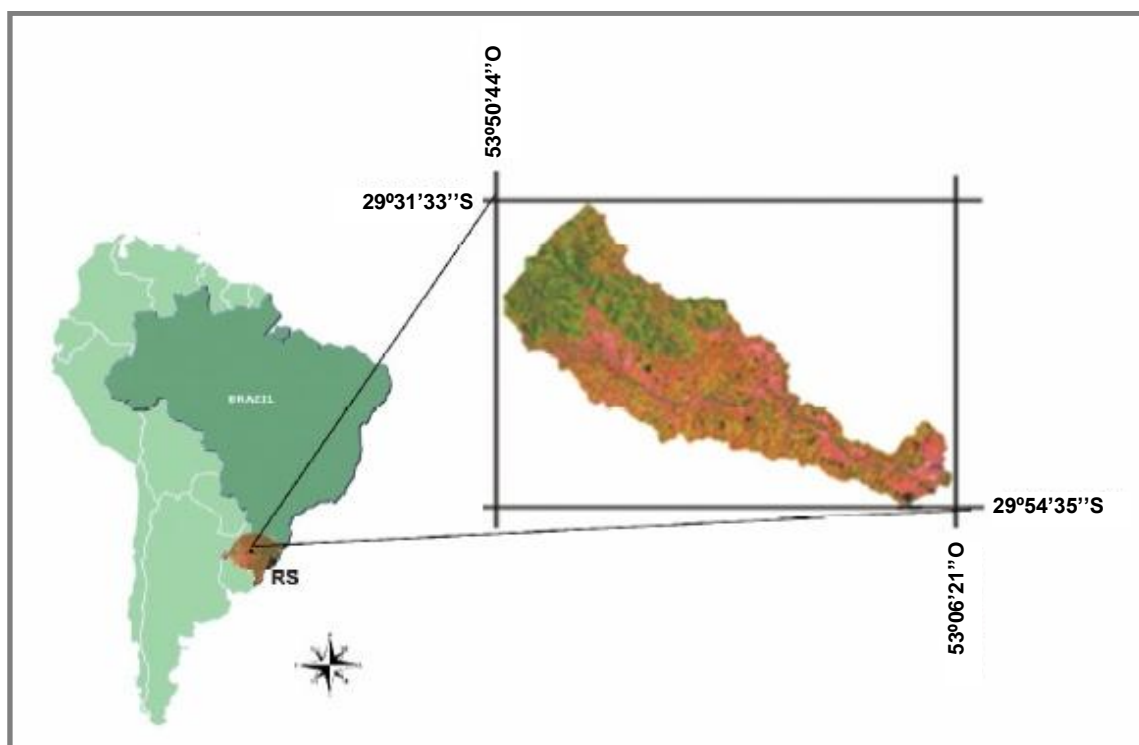
A autora concluiu que “os dois processos de transferência de massa (reaeração e dissolução do sólido) sofrem influências diferentes a partir do aumento da escala física e conseqüente mudança na estrutura da turbulência e na macro-estrutura do escoamento (turbilhões e estruturas correlatas)”.



### 3 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim (figura 9) está localizada na região central do Estado do Rio Grande do Sul. Possui área total de 1120 Km<sup>2</sup>, abrangendo cinco municípios: Santa Maria, Restinga Seca, Itaara, São João do Polesine e Silveira Martins.

Essa bacia está situada entre as coordenadas geográficas 53°06'21" a 53°50'44" de longitude Oeste e 29°31'33" a 29°54'35" de latitude Sul. Faz parte da bacia G60 – Vacacaí – Vacacaí Mirim, Região Hidrográfica do Guaíba, do Sistema Estadual de Recursos Hídricos, instituído nos termos da lei 10350/1994 e do decreto número 37034/1996, que regulamentam o Artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul (Oppa, 2007).



**Figura 9 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim**

Oppa (2007) descreve as características referentes ao uso e ocupação do solo, ao reservatório localizado à montante da bacia, e os problemas gerados pela crescente urbanização na bacia hidrográfica:

À montante da bacia, está localizado o reservatório da bacia do rio Vacacaí Mirim, com área inundada de 0,74 km<sup>2</sup>, volume de  $3,8 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, com bacia contribuinte de aproximadamente 29 km<sup>2</sup>. Esse reservatório é responsável por 40% do abastecimento público da cidade de Santa Maria. A área do reservatório é caracterizada pela mata nativa, agricultura de cultivos anuais

e permanentes, pecuária (em menor escala) e balneários. Há uma pequena, porém crescente, área em fase de urbanização. Abaixo do reservatório, a bacia é característica de área urbana em sua margem direita e de área rural, com campo nativo e agricultura irrigada em sua margem esquerda. Na parte baixa da bacia, há predominância do cultivo de arroz irrigado por inundação, com elevadas taxas de consumo de água.

A bacia do rio Vacacaí Mirim sofre os efeitos da expansão urbana e da atividade agrícola, ocasionando sérios problemas de qualidade e quantidade da água. A maior parte da população presente na bacia ocupa a área urbana. A parcial disponibilidade de rede coletora e tratamento de esgoto na região aumentam a poluição das águas. A falta de conscientização da população e de fiscalização por parte das prefeituras faz com que a população descarte o esgoto, sem tratamento prévio, em córregos e no rio, resultando em problemas qualitativos. Outro fator, que afeta qualitativamente as águas e que deve ser citado, é a poluição difusa oriunda do meio rural. Substâncias presentes em agrotóxicos e fertilizantes e que estão em excesso nas plantações de arroz vão parar no rio devido ao escoamento superficial. As lavouras de arroz na bacia do Rio Vacacaí Mirim ocupam grande parte das várzeas ao longo do rio principal e seus afluentes.

Para o estudo da cinética de desoxigenação no rio Vacacaí Mirim foram selecionadas três seções de características distintas: a primeira está situada imediatamente a jusante do reservatório, numa área em expansão urbana e sem a devida infra-estrutura para coleta e tratamento de esgoto; a segunda está numa região considerada mista, com moderada ocupação urbana e próxima a áreas de plantação de arroz; já a terceira seção representa uma área essencialmente rural, em meio às já citadas plantações de arroz que predominam na parte baixa da bacia.

O estudo da reaeração superficial foi conduzido na área mais urbanizada da bacia hidrográfica, correspondente à primeira seção de estudos para a cinética de desoxigenação. Selecionaram-se três seções, originando dois diferentes trechos de estudo entre as seções. O primeiro trecho, entre as seções R1 e R2, possui um comprimento total de 370 metros, enquanto o segundo, posicionado entre as seções R2 e R3, perfaz 1590 metros. Ambos estão em uma região de declividade elevada, sendo o escoamento raso durante todo o ano.

Nas figuras 10 e 11 estão ilustradas a localização das seções de estudo em relação à bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim.

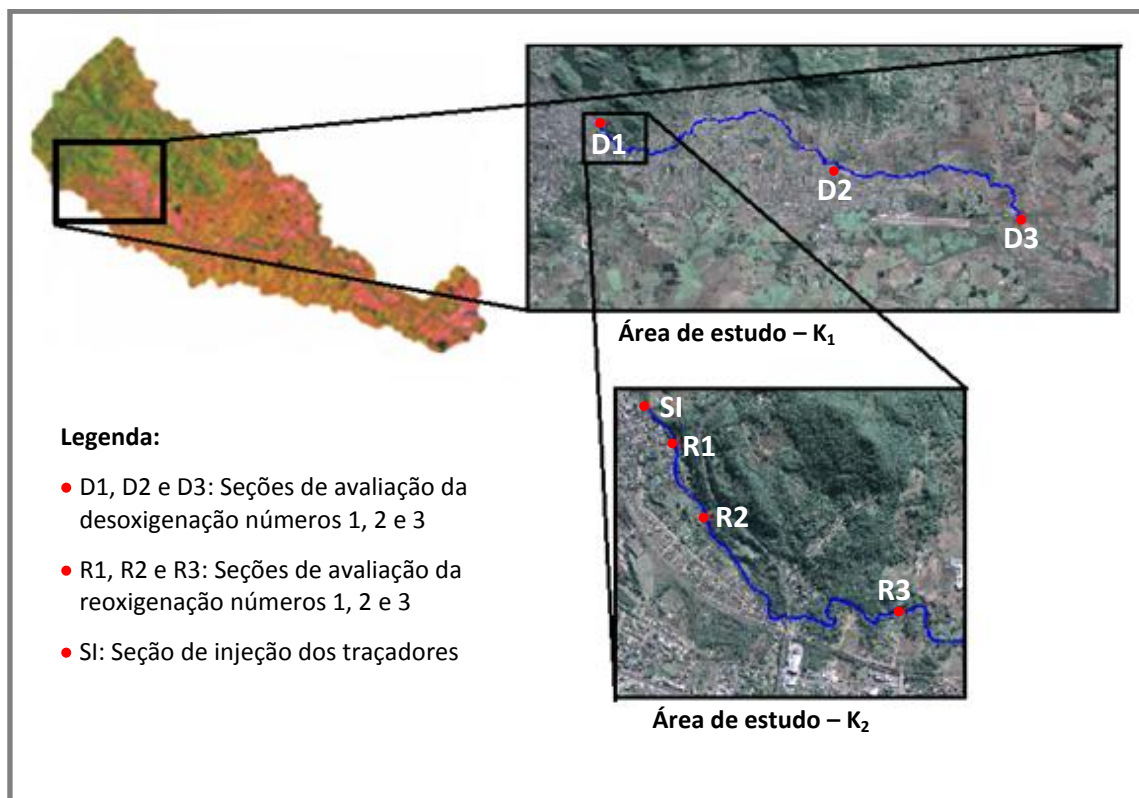


Figura 10 – Localização das áreas e seções para determinação de  $K_1$  e  $K_2$

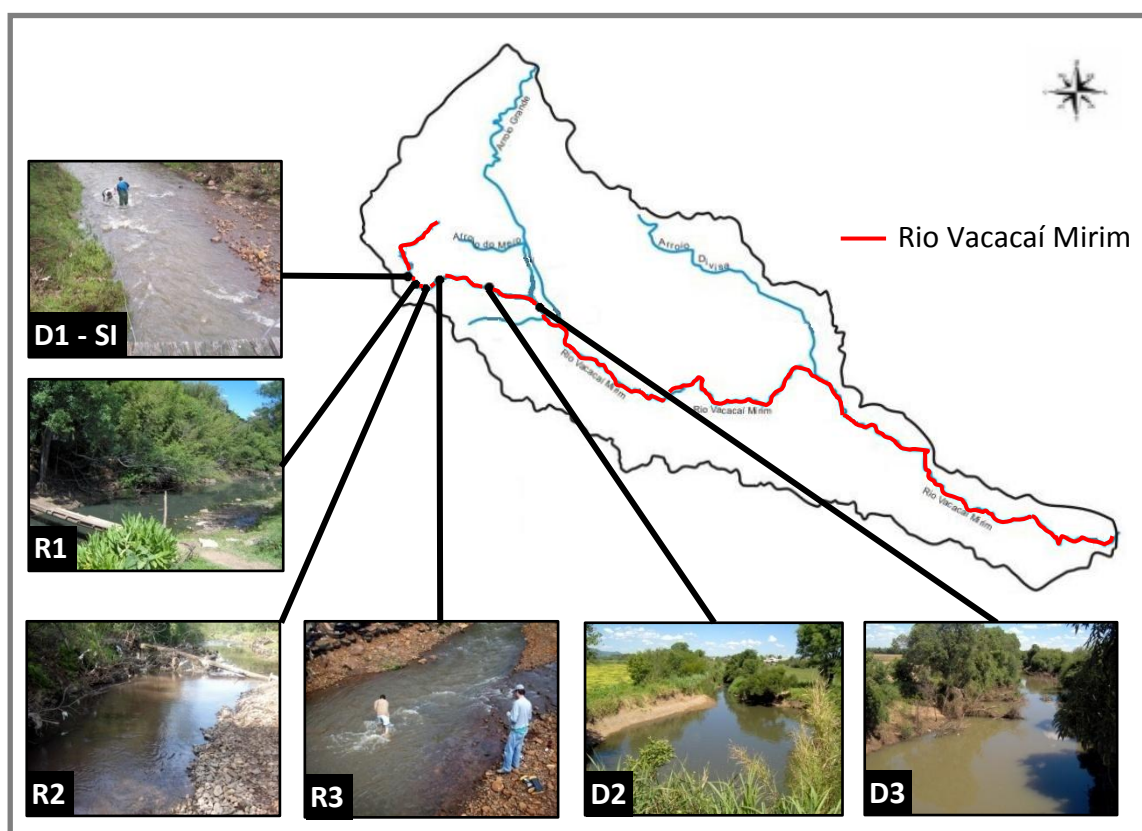


Figura 11 – Seções de estudo

Na tabela 7 apresentam-se as coordenadas geográficas das seções estudadas, na seqüência em que elas ocorrem ao longo do rio.

**Tabela 7 – Coordenadas geográficas das seções de estudo**

Seção	Latitude	Longitude
D1 - SI	29°40'54.54"S	53°46'53.51"O
R1	29°41'0.87"S	53°46'48.31"O
R2	29°41'11.12"S	53°46'42.85"O
R3	29°41'26.79"S	53°46'5.33"O
D2	29°41'51.23"S	53°42'31.91"O
D3	29°42'36.53"S	53°39'39.80"O

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Determinação do coeficiente de desoxigenação

#### 4.1.1 Coleta das amostras

Amostras foram coletadas no centro do escoamento, recolhidas em garrafas de polipropileno com capacidade para 5 litros cada, e acomodadas em caixas térmicas com banho de gelo. Imediatamente após a coleta foram transportadas ao Laboratório de Saneamento Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – CT – UFSM.

#### 4.1.2 Análises de laboratório

O procedimento experimental para determinação do coeficiente de desoxigenação seguiu as recomendações de Stamer *et al.* (1982), com algumas alterações, de maneira a adaptar a metodologia à vidraria e aos equipamentos disponíveis em laboratório.

As seguintes observações tornam-se pertinentes:

- a) Baseado na análise dos dados obtidos por Oppa, Gastaldini e Missio (2007), optou-se por não realizar diluição das amostras, uma vez que a  $DBO_u$  esperada, para todos os pontos, não seria maior que 40 mg/L e, portanto, poucas reinjeções no decorrer dos 20 dias seriam suficientes para prover o oxigênio requerido para os testes.
- b) Os tempos, relativos ao início do experimento, em que foram feitas as leituras seguiram o proposto por Stamer *et al.* (1982). No entanto, pequenas variações ocorreram entre as diferentes campanhas, de modo que se buscou adaptar as leituras sempre para dias úteis e no período diurno. Tais variações não representam problema na construção da curva de decaimento de oxigênio, já que a mesma é plotada na forma de “dispersão”.

Todos os procedimentos descritos a seguir foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – CT – UFSM:

- a) Tomou-se 1 litro de cada amostra em um frasco âmbar, de boca larga e esmerilhada. A amostra deve preencher até o bocal do frasco.
- b) Com o emprego de uma bomba de ar, uma mangueira e um difusor de pedra porosa (comumente utilizados em aquários), borbulhou-se oxigênio (atmosférico) por 15 minutos na amostra.
- c) Deixou-se repousar por mais 15 minutos, para eliminar a agitação e dissipar o excesso de bolhas de ar.
- d) Inseriu-se uma barra magnética e agitou-se brandamente a amostra para realizar a leitura.
- e) Realizou-se a leitura de oxigênio dissolvido com o auxílio de um oxímetro YSI – Yellow Springs Instrument Co., modelo 58 e outro oxímetro Solar Instrumentação, modelo SL 520 (figura 12). A calibração foi realizada de acordo com o descrito no manual, baseado na concentração de oxigênio no ar com 100% de umidade, levando em conta a altitude do local e a temperatura.
- f) Adicionou-se 0,54g de inibidor de nitrificação a base de *2-Cloro-6-(Triclorometil)Piridina*.
- g) Tampou-se cuidadosamente os frascos, tomando-se o cuidado de não deixar bolhas de ar no interior do mesmo.
- h) Incubou-se a amostra no escuro, à temperatura de 20°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ).
- i) Realizaram-se novas medições de modo a aproximar-se de:  $t = 0, 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, \text{ e } 20$  dias.
- j) De modo a repor as pequenas quantidades de amostra perdidas em cada leitura (retidas no corpo da sonda do oxímetro) e desta forma evitar a retenção de bolhas de ar ao tampar novamente os frascos, mantiveram-se incubadas amostras “replicatas”, sob as mesmas condições das amostras em análise.

Os dados obtidos foram tratados com o software Microsoft Excel 2007, gerando as curvas de decaimento de oxigênio *versus* tempo e DBO exercida *versus* tempo. Empregando a equação 4 e utilizando o método de ajuste não linear por

mínimos quadrados, por meio da ferramenta *Solver*, determinou-se o valor do coeficiente de desoxigenação  $K_1$ .



Figura 12 – Leitura da concentração de oxigênio dissolvido e amostras no interior da incubadora

## 4.2 Determinação do coeficiente de reaeração superficial

Na determinação experimental do coeficiente de reaeração utilizou-se a metodologia dos traçadores modificada, empregando a Rodamina WT como traçador conservativo e o gás propano como traçador volátil.

Trabalhou-se com o método do patamar do gás propano, pelos fatores citados a seguir:

- a) Este método permite a coleta de várias amostras, em diferentes tempos do experimento, que teoricamente apresentam a mesma concentração de gás. Isto é importante para o caso em que as metodologias de campo e analítica estão sendo implementadas, e conseqüentemente não se tem conhecimento da magnitude de concentração nem do desvio apresentado entre as amostras.
- b) O traçador de referência pode ser injetado instantaneamente (figura 13), sem que haja necessidade de um equipamento, como uma bomba



peristáltica ou um vaso de Mariotte, para realizar a injeção contínua à uma vazão constante. Tal fator reduz os custos do experimento, a complexidade do mesmo, além de eliminar a necessidade de uma pessoa a mais para monitorar a injeção do traçador.

- c) A injeção instantânea do traçador de referência gera as nuvens de passagem com a menor duração possível, o que agiliza o deslocamento da equipe entre uma seção de amostragem e outra, além de indicar exatamente o momento a partir do qual o patamar de gás se estabilizou e as amostras devem ser coletadas.

Determinou-se a vazão de injeção do gás a partir das estimativas da equação 19 e da figura 7, projetando uma concentração na seção de coleta mais a jusante de no mínimo  $1 \mu\text{g/L}$ .

O gás utilizado foi da marca White Martins, liquefeito em cilindro com capacidade de 45 Kg e pureza mínima de 99,5%. A vazão do propano foi controlada utilizando um regulador de pressão de duplo estágio e um rotâmetro, acoplados ao cilindro (figura 14).



**Figura 13 – Injeção instantânea de Rodamina WT ao lado do difusor de propano**





**Figura 14 – Cilindro de gás propano acoplado à regulador de pressão e rotâmetro**

Projetou-se um difusor a partir de uma mangueira de silicone de gás de cozinha comercial, de 1,20 metros de comprimento e 8 milímetros de diâmetro, com um *cap* numa das extremidades para impedir a saída do gás (figura 15). Na mangueira foram realizadas duas linhas de furação, com os orifícios espaçados de 4 milímetros cada. A furação foi feita com uma agulha de costura de aproximadamente 0,5 milímetros de diâmetro. Depois de realizada a furação, percebeu-se que os orifícios se comprimiram, só permitindo a saída do gás a uma determinada pressão, o que reduz ainda mais o diâmetro da bolha gasosa e conseqüentemente aumenta a eficiência de absorção.



**Figura 15 – Mangueira difusora de gás e suporte de fixação**

O difusor foi acoplado a um suporte metálico com quatro hastes pontiagudas, que foram cravadas no leito do rio para garantir a fixação do sistema de injeção.

Utilizou-se o traçador Rodamina WT da marca *Turner Designs*, com concentração aproximada de 20%. Para a detecção da mesma empregou-se um fluorímetro de campo também da marca *Turner Designs*, modelo *AquaFluor*. As leituras de fluorescência e de concentração de Rodamina WT foram realizadas em campo, simultaneamente à passagem do traçador.



**Figura 16 – Fluorímetro de campo**

Para a amostragem do gás propano no corpo d'água, desenvolveu-se uma metodologia simples e de baixo custo, mas que se mostrou satisfatória. No canal do Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSM, testou-se o nível de agitação e turbulência provocado para o enchimento de uma pipeta volumétrica ao mergulhá-la na água em escoamento. Concluiu-se que ao mergulhar a pipeta de forma invertida (com o orifício maior para baixo) a uma inclinação de  $45^\circ$  na direção do escoamento (figura 17), a pipeta completa-se de água com o menor nível de perturbação. Após o enchimento da pipeta, bloqueia-se a parte inferior com o dedo indicador, retira-se o excesso de amostra até chegar ao menisco de calibração e adiciona-se a amostra ao frasco de armazenamento.

Os frascos utilizados para o armazenamento das amostras de propano foram de vidro âmbar, com capacidade para 250 mL e tampa plástica rosqueada (figura 18). Foi feito um orifício central de 2 milímetros de diâmetro na tampa e, no

fechamento dos frascos contendo as amostras, introduziu-se um septo de silicone entre a tampa e o frasco. Este procedimento garantiu a vedação adequada e permitiu que o frasco fosse utilizado diretamente para a análise de cromatografia gasosa por *headspace*, coletando a amostra com uma agulha que perfurou o septo.

As amostras coletadas foram imediatamente refrigeradas e ao final do experimento encaminhadas ao laboratório de cromatografia da Fundação Universidade Regional de Blumenau - SC, onde determinou-se a concentração de propano, conforme já mencionado, por cromatografia gasosa de *headspace*.

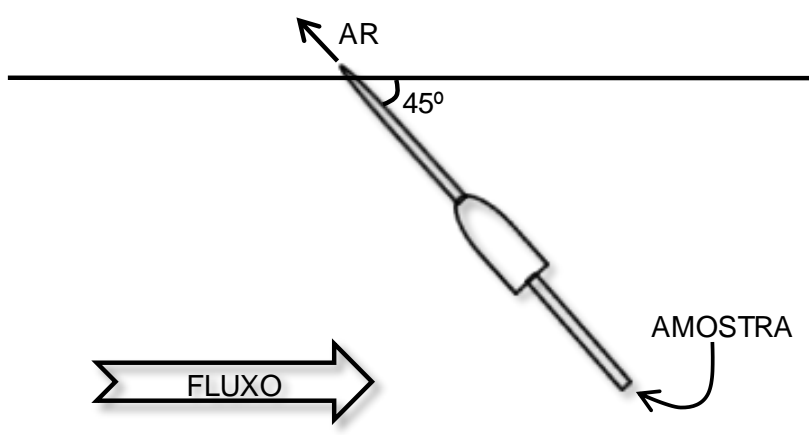


Figura 17 – Esquema de amostragem de gás em água com pipeta volumétrica



Figura 18 – Armazenamento da amostra em frasco âmbar com septo de silicone

Para o cálculo do coeficiente de reaeração superficial, construíram-se as curvas de passagem (concentração *versus* tempo) de ambos os traçadores. Baseado na diferença entre os patamares de concentração do traçador gasoso nas

seções de amostragem, no tempo de viagem do centróide da curva de passagem da Rodamina WT entre as mesmas seções, da vazão e da temperatura da água nos trechos, determinou-se o valor de  $K_2$  empregando as equações 11, 14 e 18.

### **4.3 Obtenção dos parâmetros de entrada para estimativa de $K_2$ por meio das equações de previsão**

As vazões foram determinadas nas seções de amostragem por meio da medição da velocidade. De acordo com a característica da seção, utilizou-se o micromolinete marca OTT, modelo C2, ou o molinete marca OTT, modelo C31 para a determinação das velocidades. Posteriormente, com o auxílio do software HIDROMOLINETES (Registro INPI 0067702), calcularam-se as vazões correspondentes, utilizando o método da seção média (ou método de Simpson simplificado).

O número de verticais, a distância entre as mesmas, bem como a(s) profundidade(s) de medição foram definidas de acordo com as características de cada seção, seguindo as orientações de DNAEE (1977, apud PAIVA, 2001, pg. 541) e Azevedo Neto (1966, apud PAIVA, 2001, pg. 541).

O tempo de viagem dos traçadores entre as seções de amostragem foi calculado pela determinação do centróide da curva de passagem da Rodamina WT em cada seção. O procedimento de integração numérica para obtenção do centróide de uma curva de passagem de um traçador é apresentado por Kilpatrick *et al.* (1989).

As velocidades médias do escoamento nos trechos estudados foram calculadas por meio do tempo de viagem dos traçadores e a distância entre as seções.

Determinou-se a profundidade média de uma seção dividindo-se a área da seção pela sua largura. Como o valor da profundidade deve representar a média no trecho, selecionaram-se seções representativas dentro do trecho e suas respectivas profundidades foram ponderadas de acordo com a fração que cada uma representa.

A declividade média de cada trecho foi determinada com a utilização de um equipamento estação total da marca Zeiss, modelo Elta R55.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Determinação do coeficiente de desoxigenação

A primeira campanha de determinação do coeficiente de desoxigenação foi realizada no dia 11 de janeiro de 2010. O objetivo desta primeira análise foi testar a metodologia, tanto de coleta como de análise, que se pretendia utilizar. Observou-se o tempo de transporte das amostras entre os pontos de coleta e o laboratório, a duração do procedimento em laboratório, bem como o comportamento do oxigênio dissolvido nas amostras no decorrer dos 20 dias de observação. Esta campanha foi importante para a padronização, entre os membros da equipe responsáveis pelas medições, dos procedimentos descritos na metodologia de análise de laboratório, como, por exemplo, a calibração do oxímetro, a manipulação dos agitadores magnéticos, a abertura e fechamento dos frascos, etc. As curvas obtidas nesta campanha foram satisfatórias, no entanto não foram incluídas neste trabalho porque, no momento da coleta das amostras, não foram medidas as descargas líquidas das seções de amostragem.

Posteriormente, três campanhas completas de coleta de amostras e medição de vazão foram realizadas: nos dias 11 de março e 07 de abril, em período seco, após pelo menos uma semana sem ocorrência de precipitação; e no dia 27 de abril de 2010, logo após um período chuvoso.

Na tabela 8 e nas figuras de 19 a 27 são apresentados os resultados obtidos na determinação do coeficiente de desoxigenação  $K_1$ , nas três seções analisadas e em três diferentes experimentos. Os dados são correlacionados com as vazões do momento da coleta, que via de regra representam a maior ou menor diluição da carga orgânica lançada no corpo d'água pontualmente ou de forma difusa, além da  $DBO_5$  e a  $DBO_u$  observada.

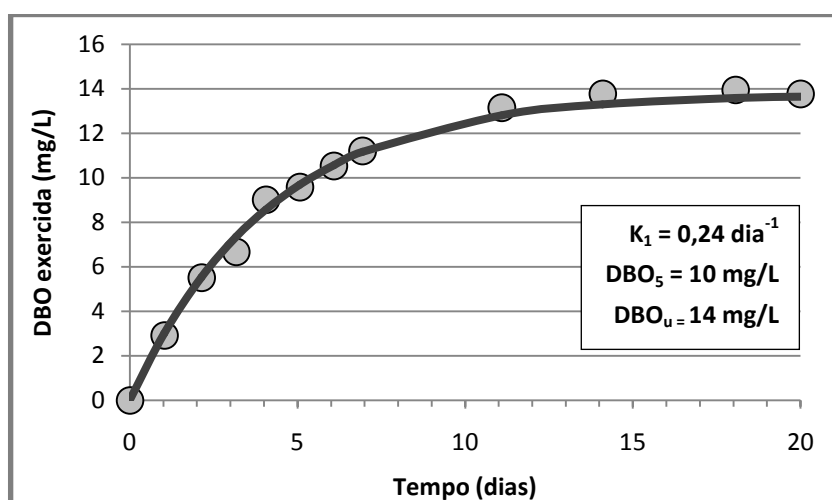
Todos os valores de  $K_1$  foram calculados e conseqüentemente apresentados na base e. Não foi necessária a correção de temperatura em nenhum dos casos, já que durante a realização dos experimentos as amostras permaneceram encubadas a 20°C, que é a temperatura de referência do coeficiente. As planilhas com os dados completos de cada evento encontram-se nos apêndices 5, 6 e 7. Cabe ressaltar que, nos apêndices, os valores de OD que ultrapassam a concentração de saturação

(aproximadamente 9 mg/L para a temperatura ambiente) representam o somatório das reinjeções de oxigênio que foram realizadas.

Os coeficiente de desoxigenação variaram entre  $0,15 \text{ dia}^{-1}$  (seções D2 e D3, no dia 11 de março de 2010) e  $0,27 \text{ dia}^{-1}$  (seção D2, no dia 27 de abril de 2010). Os valores de  $K_1$  para a seção D1, de característica predominantemente urbana, apresentaram pouca variação, entre  $0,22 \text{ dia}^{-1}$  e  $0,24 \text{ dia}^{-1}$ , sendo que a  $DBO_5$  e  $DBO_u$  deste ponto foram consideravelmente mais elevadas que nos outros pontos estudados.

**Tabela 8 – Valores obtidos para  $K_1$  (base e, 20°C),  $DBO_5$  e  $DBO_u$  em cada seção de amostragem, com a respectiva  $DBO_5$ ,  $DBO_u$  e vazão do dia da coleta**

Seção	Parâmetros	$K_1$ ( $\text{dia}^{-1}$ )	Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$DBO_5$ (mg/L)	$DBO_u$ (mg/L)
<b>11/3/2010</b>					
D1		0,24	0,017	10	14
D2		0,15	0,217	1	3
D3		0,15	1,87	1	1
<b>7/4/2010</b>					
D1		0,22	0,013	20	31
D2		0,17	0,02	3	5
D3		0,18	0,60	2	3
<b>27/4/2010</b>					
D1		0,23	0,018	16	22
D2		0,27	0,35	3	4
D3		0,21	3,33	2	4



**Figura 19 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 11/03/2010 – Seção D1**



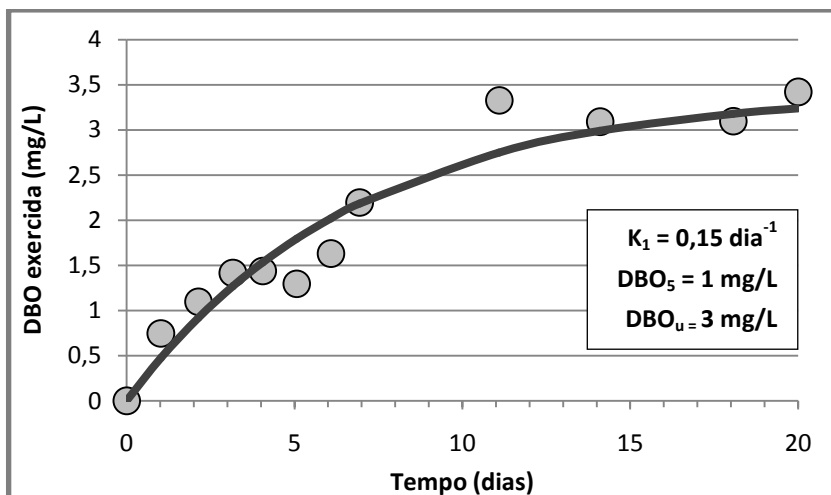


Figura 20 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 11/03/2010 – Seção D2

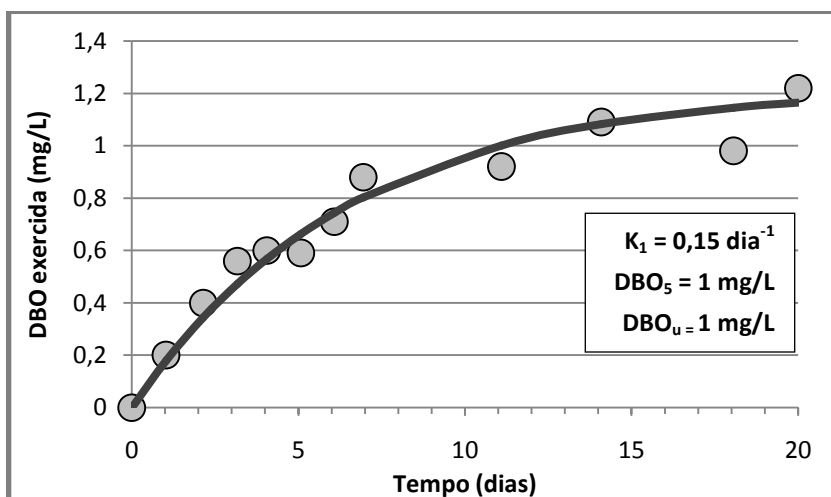


Figura 21 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 11/03/2010 – Seção D3

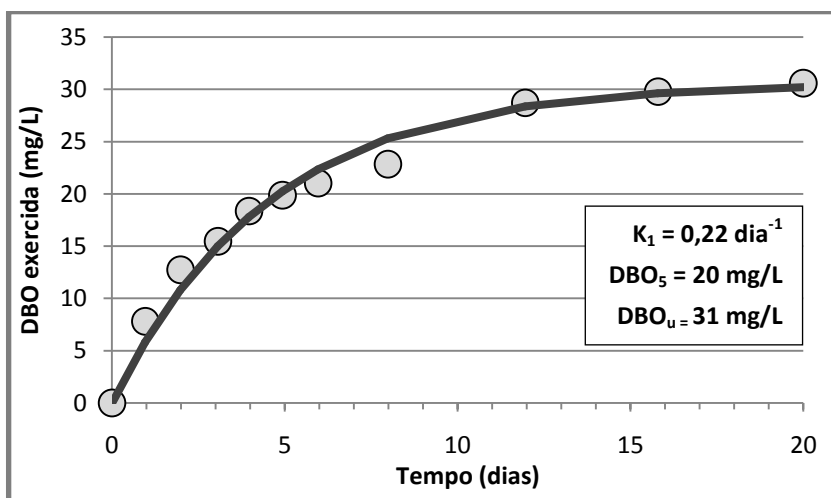


Figura 22 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 07/04/2010 – Seção D1

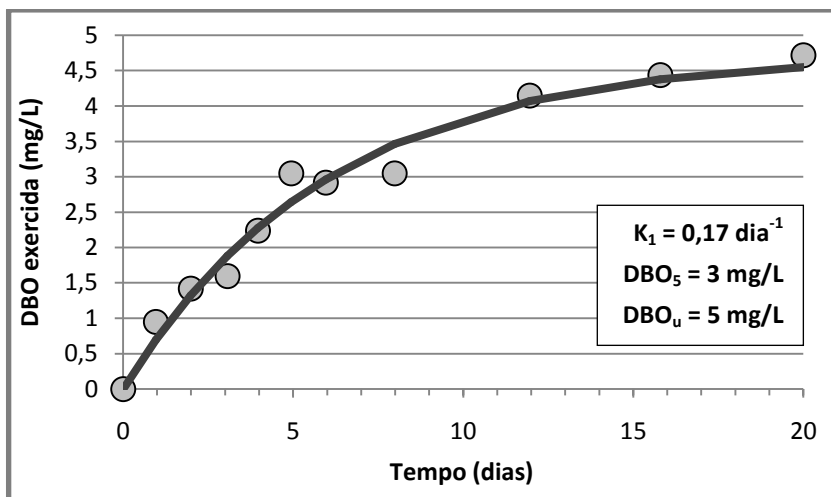


Figura 23 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 07/04/2010 – Seção D2

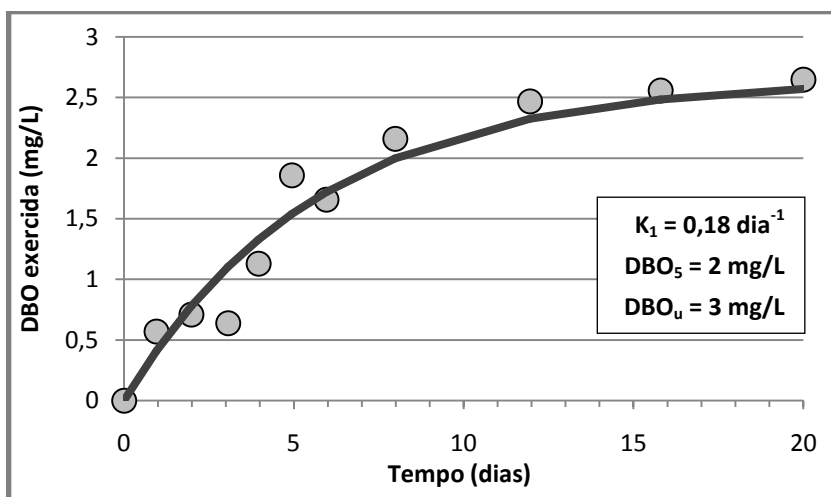


Figura 24 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 07/04/2010 – Seção D3

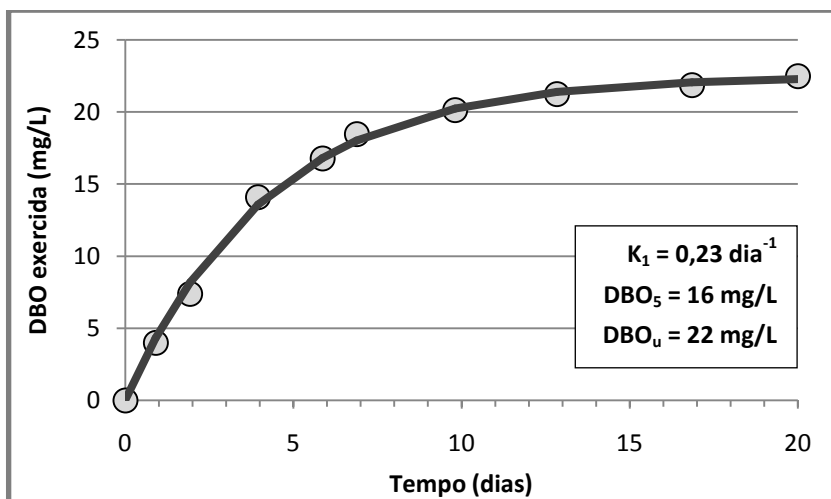


Figura 25 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 27/04/2010 – Seção D1



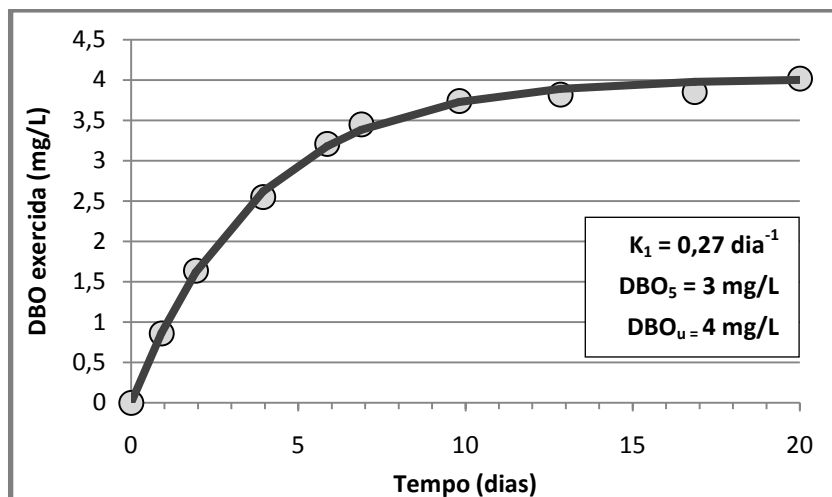


Figura 26 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 27/04/2010 – Seção D2

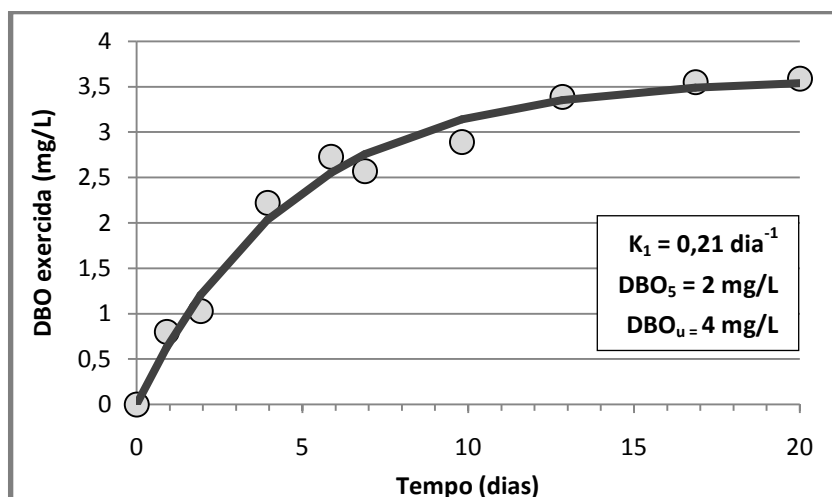


Figura 27 – DBO exercida observada x tempo e ajuste não linear por mínimos quadrados: experimento 27/04/2010 – Seção D3

## 5.2 Determinação do coeficiente de reaeração superficial

### 5.2.1 Ensaios preliminares com o traçador Rodamina WT

Diversas variáveis características da nuvem traçadora são de fundamental importância para o planejamento dos testes envolvendo a injeção do gás propano. Para determinar tais características, uma série de ensaios de campo envolvendo apenas a injeção de Rodamina WT foi realizada. O objetivo inicial foi determinar o tempo de viagem entre as seções, as concentrações de pico e a área das curvas de

passagem, além de verificar se a equação de estimativa para a quantidade de traçador necessária confirmavam-se experimentalmente.

No dia 18 de agosto de 2010 realizou-se o primeiro experimento. Foram injetados instantaneamente 50 mL de Rodamina WT – 20% no centro do escoamento, no ponto de injeção (SI) descrito na área de estudo. A injeção foi realizada exatamente às 08h41min, horário que passou a ser o “zero” para a construção da curva de passagem da Rodamina. A vazão no momento do experimento era de  $0,036 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Verificou-se que a curva de passagem no primeiro ponto de observação apresentou o comportamento esperado, com um aumento rápido de concentração, até chegar à concentração de pico, que foi de  $99,71 \mu\text{g/L}$ , 119 minutos após a injeção. Depois de atingir o pico, a curva apresentou um lento decaimento na concentração, sendo que somente no tempo de 229 minutos, às 12h30min, a passagem do traçador pela seção foi encerrada. Na figura 28 é apresentada a curva de passagem da Rodamina WT para o experimento do dia 18 de agosto de 2010.

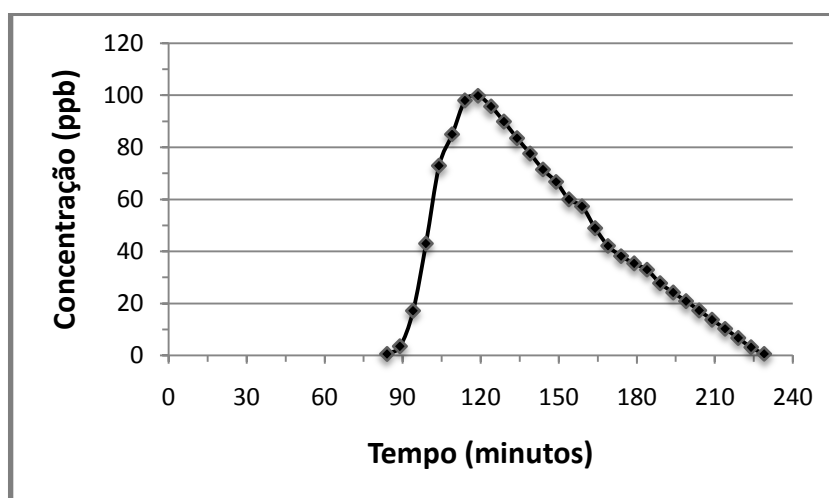


Figura 28 – Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 18/08/2010 – seção R1

Pretendia-se utilizar o ponto de amostragem R3 como seção de jusante neste experimento. Monitorou-se a seção durante toda a tarde e na manhã seguinte, porém nenhum indício do traçador fluorescente foi encontrado. No dia seguinte, uma moradora da margem da seção de estudo relatou ter observado uma cor “azulada” anômala na água por volta das 20h30min do dia 18, o mesmo dia da injeção. Tal coloração provavelmente era advinda do traçador, já que sua fluorescência à noite pode ser perceptível em tons de azul e violeta.

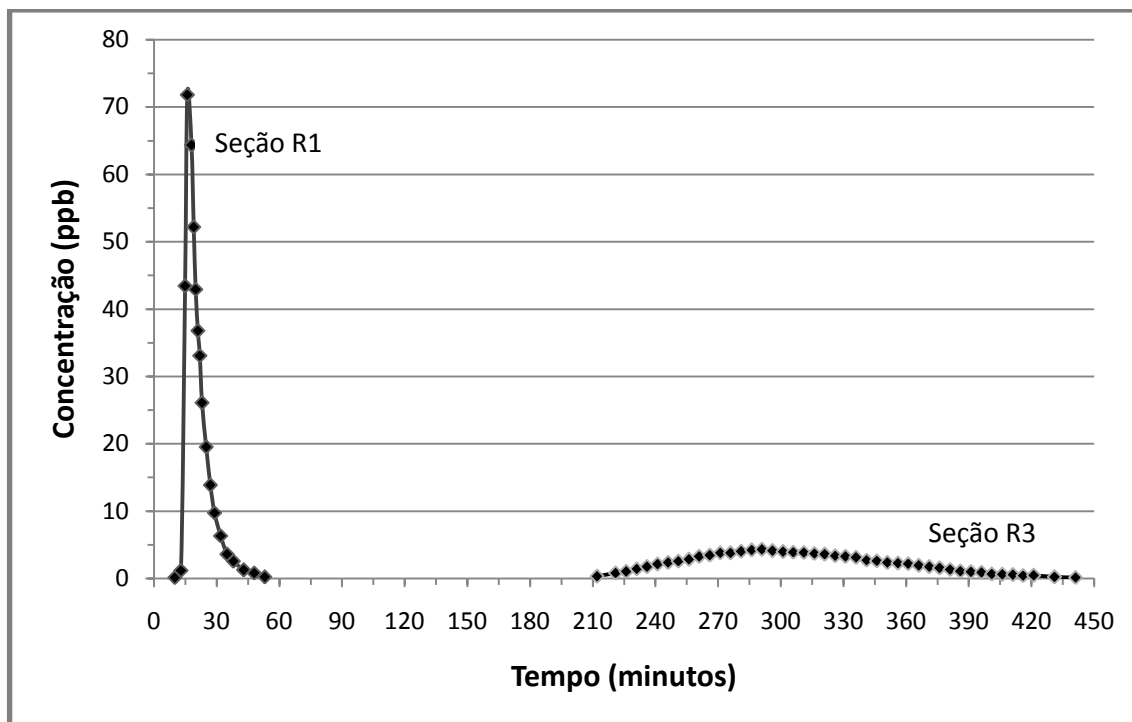
Baseado neste relato estimou-se o tempo de viagem da nuvem traçadora em 12 horas, a uma velocidade média de 0,05 m/s, o que acabou inviabilizando a utilização da seção de amostragem R3 nas condições de vazão e velocidade do dia do experimento, devido à impossibilidade de efetuar a injeção e a coleta dos traçadores em período diurno.

No dia 10 setembro de 2010, após um longo período chuvoso, e sob condições de vazão e velocidade significativamente maiores, realizou-se um novo experimento com os mesmos objetivos do ensaio anterior.

Injetou-se 50 mL de Rodamina WT – 20% no centro do escoamento, exatamente no mesmo ponto do estudo anterior. O horário exato da injeção foi às 08h19min, horário que também foi utilizado como “zero” na construção da curva de passagem da nuvem traçadora. A vazão no ponto de injeção era de 0,254 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente sete vezes maior que a descarga líquida encontrada no experimento anterior, do dia 18 de agosto. Já no ponto de jusante (seção R3) a vazão era de 0,276 m<sup>3</sup>/s.

Devido à maior velocidade do escoamento, neste evento pôde-se observar a passagem das duas nuvens traçadoras, nos pontos de amostragem R1 e R3. O pico de concentração de traçador na seção R1 foi de 71,82 µg/L, às 08h35min (16 minutos após a injeção), enquanto o pico de concentração da seção R3 foi de 4,35 µg/L, às 13h10min (291 minutos após a injeção). Já a massa total de Rodamina WT medida nas seções R1 e R3 foi de 9,44 e 8,41 gramas, respectivamente, o que representa um coeficiente de recuperação de 89%. Na figura 29 são apresentadas as curvas de passagem da Rodamina WT para o experimento do dia 10 de setembro de 2010.

O tempo total de passagem da nuvem traçadora na seção de jusante (seção R3) foi de 230 minutos. Para a realização do teste completo de reaeração superficial, com o emprego do traçador gasoso, este tempo implica em um tempo de injeção constante de gás propano de no mínimo 4 horas para atingir-se um patamar de concentração.



**Figura 29 – Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 10/09/2010 – seções R1 e R3**

Com o resultado da campanha do dia 10 de setembro vislumbrou-se possível a realização de um experimento envolvendo a injeção do gás propano e da Rodamina WT, no qual toda a curva de passagem do traçador de referência e o patamar de concentração do gás seriam obtidos no mesmo dia, em ambas as seções.

Baseado nesse resultado decidiu-se acrescentar a seção de amostragem R2 entre as duas seções previamente definidas, a fim de obter-se o maior número de dados possível para a caracterização do trecho em estudo. Também graças aos resultados obtidos nos dois experimentos anteriormente descritos, o plano de trabalho para o estudo da reaeração pôde ser elaborado. Baseado nos tempos de viagem do traçador passou-se a discutir a logística do ensaio, a divisão das equipes e dos equipamentos.

### 5.2.2 Ensaios completos de determinação do coeficiente de reaeração

No dia 17 de setembro de 2010 realizou-se o primeiro experimento completo para determinação do coeficiente de reaeração, com o emprego de gás propano e Rodamina WT. A injeção de gás foi iniciada às 08h50min e mantida a uma vazão

constante de 10,5 L/min durante 3 horas, até as 11h50min. A injeção instantânea de 75 mL de Rodamina WT – 20% foi efetuada pontualmente às 09h. Esse atraso de 10 minutos, necessário para controlar e estabilizar a vazão do cilindro de gás, foi compensado no momento em que os resultados foram plotados no gráfico. Adiantaram-se em 10 minutos todos os horários relativos às amostragens de propano e passou-se a admitir uma injeção simultânea entre os traçadores.

A vazão do rio foi a mais alta encontrada desde que os estudos de reaeração foram iniciados, 1,30 m<sup>3</sup>/s nas seções de montante (R1 e R2) e 1,41 m<sup>3</sup>/s na seção de jusante (R3). Por este motivo, durante a realização do experimento decidiu-se diminuir o tempo de injeção do gás propano, uma vez que logo se identificou que a velocidade do escoamento, e conseqüentemente dos traçadores, estava ainda mais elevada que no evento anterior. Dessa forma, o patamar de gás traçador seria atingido em um tempo consideravelmente menor.

Na tabela 9 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos e as características hidráulicas do rio no dia do experimento. Na figura 30 mostra-se a curva de passagem de ambos os traçadores sobrepostas. Os resultados de todas as leituras de Rodamina WT e as concentrações de propano, bem como o horário de cada amostragem, encontram-se no apêndice 3.

**Tabela 9 – Resultados obtidos: experimento 17/09/2010**

Parâmetros	Seção R1	Seção R2	Seção R3	Trecho 1	Trecho 2
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	1,30	1,30	1,41	-	-
Tempo de viagem (centróide) (min)	8,80	28,80	113,80	-	-
Velocidade média (m/s)	-	-	-	0,31	0,31
Profundidade média (m)	-	-	-	0,32	0,45
Declividade média (m/Km)	-	-	-	5,81	3,98
Massa de Rodamina WT (g)	19,09	17,62	15,64	-	-
Patamar de propano (médio) (ppb)	7,21	5,40	1,83	-	-
$K_2$ (dia <sup>-1</sup> )	-	-	-	30,30	24,77

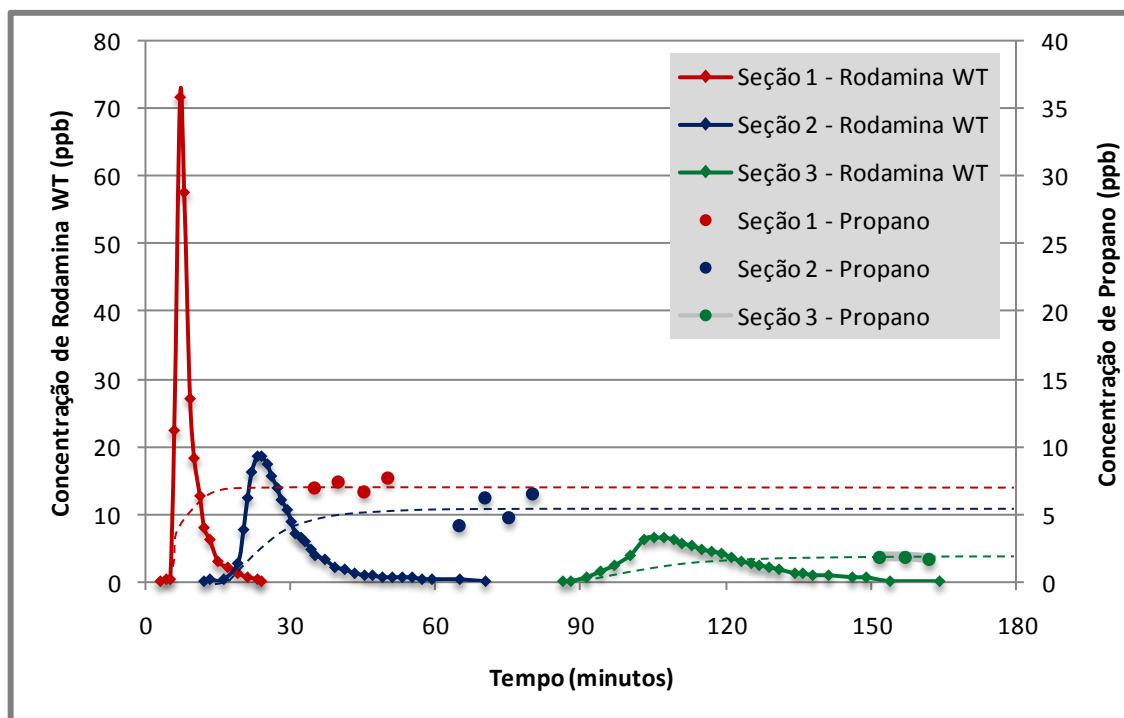


Figura 30 – Curvas de passagem dos traçadores: experimento 17/09/2010

O coeficiente de reaeração superficial foi calculado utilizando-se as equações 14 e 18, e a correção de temperatura utilizando a equação 11, resultando num valor de  $K_2$  de  $30,30 \text{ dia}^{-1}$  para o trecho número 1 e  $24,77 \text{ dia}^{-1}$  para o trecho número 2. A temperatura média do experimento nos dois trechos foi de  $18^\circ\text{C}$ . Baseado nas concentrações de propano obtidas, na vazão de injeção empregada e nos coeficientes de dessorção gasosa (equação 19), calculou-se a eficiência do sistema difusor de gás. A absorvidade obtida foi de aproximadamente 0,034, ou 3,4%.

Como a concentração de gás propano da seção de jusante do experimento foi considerada baixa, próximo ao limite detectável, e a vazão de injeção deste traçador foi praticamente ao limite máximo do aparato experimental, este evento foi considerado o de vazão máxima para a metodologia adotada. Aguardou-se um decréscimo no valor da descarga líquida para que outro ensaio fosse realizado, possibilitando a comparação dos valores de  $K_2$  obtidos em diferentes condições de escoamento.

Seguindo o mesmo procedimento do primeiro experimento, no dia 05 de outubro de 2010 realizou-se a segunda campanha completa de determinação do coeficiente de reaeração superficial. A injeção do gás iniciou-se às 08h47min, mantendo-se constante a uma vazão de 10,5 L/min durante 5 horas, até as 13h47min. Injetou-se instantaneamente 75 mL de Rodamina WT – 20% às

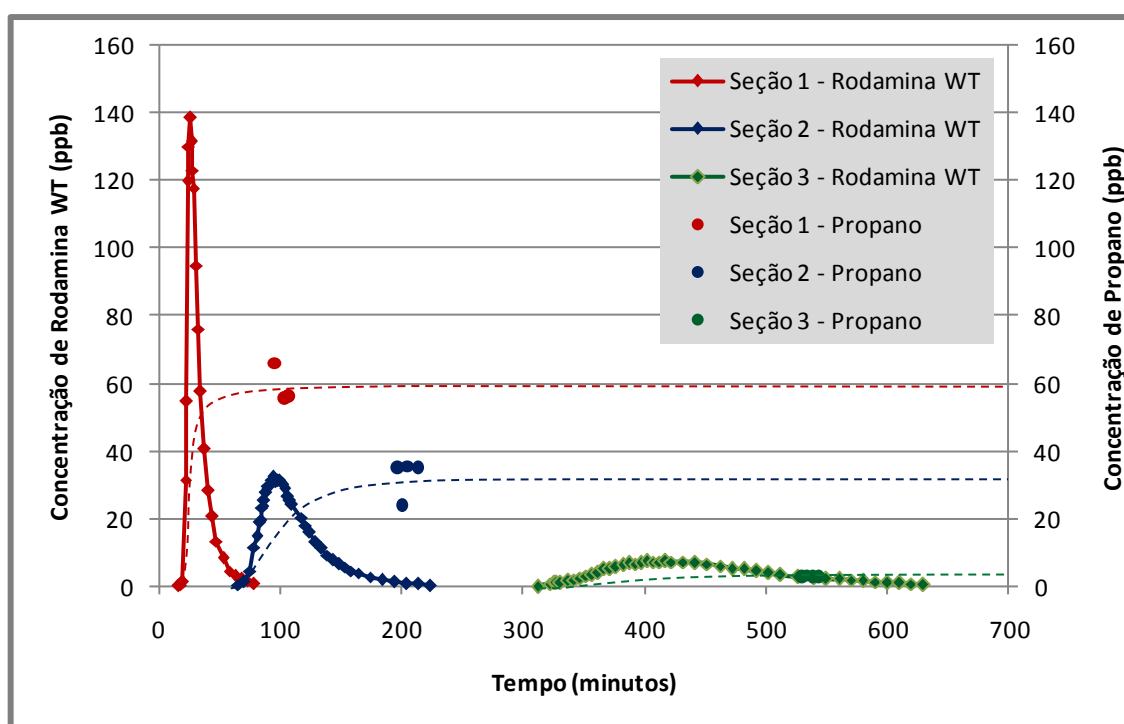
08h55min. O mesmo artifício da campanha anterior para correção dos horários da injeção dos traçadores foi utilizado, sendo então a injeção considerada simultânea.

Neste evento as vazões eram de 0,145 m<sup>3</sup>/s e 0,176 m<sup>3</sup>/s, respectivamente para as seções de montante (R1 e R2) e a seção de jusante (R3).

Na tabela 10 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos e as condições hidráulicas do rio. Na figura 31 é mostrada a curva de passagem dos traçadores. Os resultados de todas as leituras de Rodamina WT e concentrações de propano, bem como o horário de cada amostragem, encontram-se no apêndice 4.

**Tabela 10 – Resultados obtidos: experimento 05/10/2010**

Parâmetros	Seção R1	Seção R2	Seção R3	Trecho 1	Trecho 2
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	0,145	0,145	0,176	-	-
Tempo de viagem (centróide) (min)	32,7	113,2	448,3	-	-
Velocidade média (m/s)	-	-	-	0,08	0,08
Profundidade média (m)	-	-	-	0,23	0,35
Declividade média (m/Km)	-	-	-	5,81	3,98
Massa de Rodamina WT (g)	16,21	13,95	12,73	-	-
Patamar de propano (médio) (ppb)	59,47	37,84	3,19	-	-
$K_2$ (dia <sup>-1</sup> )	-	-	-	14,91	12,73



**Figura 31 – Curvas de passagem dos traçadores: experimento 05/10/2010**

Da mesma forma que no evento anterior, calculou-se o coeficiente de reaeração superficial empregando-se as equações 14 e 18. O valor de  $K_2$  encontrado para o trecho 1 foi de  $14,91 \text{ dia}^{-1}$ , enquanto que no segundo trecho o coeficiente  $K_2$  foi de  $12,73 \text{ dia}^{-1}$ . Não foi necessária a correção de temperatura, uma vez que para ambos os trechos a temperatura média medida foi de  $20^\circ\text{C}$ , que é a temperatura de referência para o coeficiente. Da mesma maneira que no ensaio anterior, obteve-se uma eficiência de absorção de gás propano pelo corpo d'água de aproximadamente 0,034, ou 3,4%.

### 5.3 Equações de previsão do coeficiente de reaeração superficial

As equações discutidas no item 2.7 foram testadas utilizando os dados obtidos experimentalmente nas duas campanhas de determinação de  $K_2$  (vazão, tempo de viagem, velocidade média, profundidade média, declividade média). Uma comparação entre os valores advindos destas equações de previsão e os valores obtidos experimentalmente para  $K_2$  foi realizada, expressando a variação percentualmente, da seguinte forma:

$$\text{Variação (\%)} = \frac{K_2\text{previsto} - K_2\text{observado}}{K_2\text{observado}} \times 100 \quad (36)$$

Os resultados comparativos obtidos para a primeira campanha, do dia 17 de setembro de 2010, estão dispostos na tabela 11.

Para o trecho 1, a menor variação observada foi relativa ao valor de  $K_2$  previsto pela equação de Tsivoglou e Wallace (-8,93%), embora as equações de Tsivoglou e Neal, Parker e Gay, e Smoot tenham apresentado resposta muito semelhante (-9,31%, -12,84% e -11,95%, respectivamente). Já para o trecho 2, a equação de Parker e Gay foi a que mais se aproximou do resultado obtido experimentalmente (-14,58%).



**Tabela 11 – Comparação entre os valores de  $K_2$  (base e, 20°C) previstos pelas equações e observados no experimento do dia 17/09/2010**

Pesquisador	Trecho 1		Trecho 2	
	$K_2$ (dia <sup>-1</sup> )	Variação (%)	$K_2$ (dia <sup>-1</sup> )	Variação (%)
O'Connor & Dobbins (1958)	12,12	-60,01	7,31	-70,50
Churchill <i>et al.</i> (1962)	10,71	-64,66	6,13	-75,27
Owens <i>et al.</i> (1964)	19,83	-34,55	10,63	-57,07
Langbein e Durum (1967)	7,20	-76,24	4,63	-81,32
Tsivoglou e Wallace (1972)	27,59	-8,93	19,11	-22,83
Tsivoglou e Neal (1976)	27,48	-9,31	19,03	-23,15
Parker e Gay (1987)	26,41	-12,84	21,16	-14,58
Smoot (1988)	26,77	-11,65	16,61	-32,95
Melching e Flores (1999)	20,39	-32,70	16,63	-32,86
<b>Observado</b>	30,30	-	24,77	-

Na tabela 12 está apresentado o mesmo enfoque comparativo da tabela anterior, porém para os dados relativos ao segundo experimento de determinação de  $K_2$ , realizado no dia 05 de outubro de 2010.

Percebe-se que a equação de Melching e Flores foi a que apresentou a menor variação percentual (-2,99%) em relação ao valor de  $K_2$  obtido experimentalmente para o trecho 1. As equações de Owens *et al.*, Tsivoglou e Wallace, Tsivoglou e Neal, Parker e Gay, e Smoot, também apresentaram valor estimativo do coeficiente de reaeração próximo ao valor experimental, entre -6,91% e 14,51%. No trecho 2, novamente a equação de Parker e Gay se aproximou mais do valor empírico, com variação de 6,74%, enquanto a equação de Melching e Flores apresentou variação de -9,59%.

**Tabela 12 – Comparação entre os valores de  $K_2$  (base e, 20°C) previstos pelas equações e observados no experimento do dia 05/10/2010**

Pesquisador	Trecho 1		Trecho 2	
	$K_2$ (dia <sup>-1</sup> )	Variação (%)	$K_2$ (dia <sup>-1</sup> )	Variação (%)
O'Connor & Dobbins (1958)	9,91	-33,52	5,36	-57,86
Churchill <i>et al.</i> (1962)	4,82	-67,70	2,46	-80,65
Owens <i>et al.</i> (1964)	14,37	-3,60	6,75	-46,96
Langbein e Durum (1967)	2,78	-81,39	1,64	-87,13
Tsivoglou e Wallace (1972)	14,07	-5,64	9,95	-21,86
Tsivoglou e Neal (1976)	13,88	-6,91	9,81	-22,91
Parker e Gay (1987)	17,07	14,51	13,59	6,74
Smoot (1988)	16,21	8,72	9,60	-24,59
Melching e Flores (1999)	14,46	-2,99	11,51	-9,59
<b>Observado</b>	14,91	-	12,73	-

#### 5.4 Proposta de equação para estimativa do coeficiente de reaeração superficial nos trechos estudados

Com o intuito de auxiliar nos futuros trabalhos de modelagem de qualidade da água nos trechos estudados neste trabalho, dada a relevância dessas áreas, pela crescente urbanização e proximidade do reservatório que abastece parte da cidade de Santa Maria – RS, propôs-se uma equação de estimativa do coeficiente de reaeração superficial para os referidos trechos.

Considerando que foram levantados quatro valores experimentais de  $K_2$ , para dois trechos em dois diferentes experimentos, buscou-se simplesmente ajustar os termos de uma equação já proposta para o caso particular estudado. As equações escolhidas foram as de Melching e Flores (1999), pelas seguintes razões:

- Tratam-se das mais recentes das equações estudadas, que conseqüentemente utilizaram o maior número de dados disponíveis para o trabalho estatístico.
- Utilizam como variáveis de entrada a declividade, velocidade média e vazão. Se comparadas com a profundidade média, por exemplo, que

pode ser muito variável dependendo das características do trecho, as três variáveis escolhidas são de simples determinação experimental.

- As equações de Melching e Flores (1999) apresentaram bons resultados estimativos na comparação com os valores de  $K_2$  obtidos experimentalmente nos trechos estudados, apresentando uma variação entre -32,86% e -9,59%.

A equação proposta, baseada nas equações 31 e 32, é:

$$K_2 = 836(Ui)^{0,524}Q^{-0,015} \quad (37)$$

A equação foi determinada utilizando o método de ajuste por mínimos quadrados, de forma a reduzir ao mínimo o valor da soma dos resíduos entre o valor de  $K_2$  determinado experimentalmente e o valor estimado pela equação proposta.

Na figura 32 é apresentada a correlação entre os dados experimentais e estimados, dentro da faixa em que a equação se aplica.

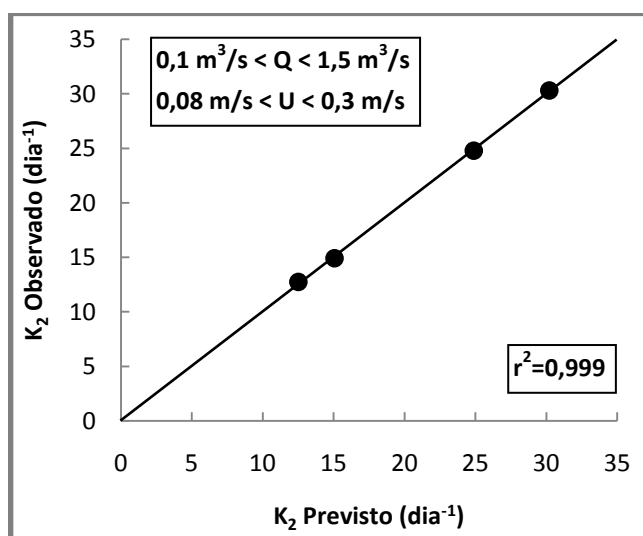


Figura 32 – Coeficientes de reaeração observados e previstos pela equação 37

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Observou-se no estudo da desoxigenação que os valores mais elevados de  $K_1$ , nas seções D2 e D3, ocorreram nos eventos de vazão mais alta, após a ocorrência de chuvas, provavelmente devido a uma maior contribuição de poluição difusa, o que evidencia a característica rural destas áreas. Já na seção D1, que representa a área de maior concentração urbana da bacia do Rio Vacacaí Mirim, os dados não puderam ser observados com a variação da descarga líquida, uma vez que o reservatório situado a montante da seção amorteceu o escoamento nos eventos estudados. Os valores de  $K_1$ , em geral, foram mais altos na seção D1 em relação às seções D2 e D3, e é provável que um aumento na vazão neste ponto provoque a diminuição do coeficiente de desoxigenação, devido à diluição do esgoto lançado pontualmente na região.

Pode-se concluir que, dentro da faixa de  $DBO_5$  estudada (1 mg/L a 20 mg/L), a  $DBO$  não apresentou uma correlação direta com o coeficiente de desoxigenação, que permaneceu em uma faixa relativamente restrita, entre  $0,15 \text{ dia}^{-1}$  e  $0,27 \text{ dia}^{-1}$ . Comparando os resultados obtidos com os sugeridos pelas tabelas 1, 2 e 3, observa-se que as seções estudadas podem ser enquadradas, quanto ao coeficiente  $K_1$ , como corpos d'água poluídos.

Analisando os resultados dos dois experimentos de reaeração em que o gás propano foi utilizado, chegou-se a um valor de absorvidade de aproximadamente 0,034, ou 3,4%. O custo médio de cada experimento, apenas com o gás injetado, foi de aproximadamente R\$ 900,00. O aprimoramento do sistema de difusão gasosa, levando a um aumento da absorvidade para, por exemplo, 10%, traria uma redução de dois terços no valor gasto com o gás. Sugere-se essa tentativa de aprimoramento com a utilização de difusores comerciais, utilizados em estações aeróbias de tratamento de águas residuárias.

O sistema desenvolvido para amostragem e armazenamento das amostras contendo gás propano dissolvido foi considerado um grande trunfo deste trabalho, pela facilidade de manuseio do material e pelo baixo custo de obtenção dos mesmos. A coleta utilizando uma pipeta volumétrica tornou o procedimento simples e dinâmico. Os frascos selados com septo de silicone apresentaram boa vedação e resistência para o transporte. Tais conclusões se comprovam pela boa repetibilidade

da concentração de propano nos níveis do patamar. Outra vantagem é que o volume de amostra coletado já é aferido e não necessita de nenhuma manipulação ou correção posterior para determinação por cromatografia gasosa de *headspace*.

Os trechos em estudo apresentaram um elevado coeficiente de reaeração, e conseqüente elevada dessorção do traçador gasoso. Observou-se também a baixa profundidade do rio, que certamente contribui para uma baixa absorvidade do gás traçador na seção de injeção. Esses fatores significam uma limitação experimental quanto à distância entre a seção de injeção e a seção mais a jusante do ensaio, uma vez que concentrações cada vez menores de gás podem ser obtidas à medida que se aumenta essa distância. Soma-se a isso a baixa velocidade do escoamento nos períodos de vazão baixa, que inviabiliza a amostragem dos traçadores em seções mais afastadas em um tempo razoável. Assim, diversos experimentos com diferentes pontos de injeção devem ser conduzidos para que se obtenham dados que representem uma maior cobertura da bacia como um todo.

A comparação entre os valores dos coeficientes de reaeração obtidos experimentalmente e pelo emprego das equações de previsão, nos dois experimentos e para os dois trechos estudados, mostra, num primeiro momento, a concordância entre os valores estimados pelas equações propostas a partir de ensaios com traçadores [Tsivoglou e Wallace (1972), Tsivoglou e Neal (1976), Parker e Gay (1987), Smoot (1988), e Melching e Flores (1999)]. As equações propostas a partir de modelos conceituais [O'Connor & Dobbins (1958), Churchill et al. (1962), Owens et al. (1964), e Langbein e Durum (1967)] apresentaram estimativas sistematicamente mais pobres, confirmando a citação de Von Sperling (2005-A) de que não seriam as equações mais adequadas para previsão de  $K_2$  em escoamentos rasos e de pequeno porte.

Comparando-se os dados de  $K_2$  obtidos neste estudo, ou os valores referenciados na tabela 4, ou ainda aqueles previstos pelas equações 25 a 32 da tabela 5, com os valores de  $K_2$  sugeridos na tabela 6, percebe-se que a tabela 6 apresenta valores para o coeficiente de reaeração significativamente mais baixos que os reais. A referida tabela é bastante difundida na literatura e por isso ressalta-se a importância de uma avaliação mais criteriosa do coeficiente de reaeração superficial antes de seu emprego, por exemplo, em uma ferramenta de modelagem de qualidade da água, sob pena de se obter resultados consideravelmente distantes da realidade.

Conforme já justificado no item 5.4, a equação 37, proposta por meio de uma adaptação das equações de Melching e Flores (1999) para os dados de  $K_2$  obtidos experimentalmente nos trechos estudados, passa a ser uma importante ferramenta para os estudos locais de modelagem de oxigênio dissolvido. Lança-se o desafio da verificação de sua validade para as vazões intermediárias assim como a extrapolação para valores fora da faixa estudada, principalmente condições de vazão mais baixa, na qual a reaeração torna-se ainda mais importante sob o ponto de vista ambiental, já que a diluição da carga orgânica lançada no corpo d'água é menor.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA JÚNIOR, A. R. **Uso de traçadores na determinação de parâmetros de qualidade em escoamentos naturais da água.** 457p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1997.

BENNETT, J.P., and RATHBUN, R.E. **Reaeration in open-channel flow.** U.S. Geological Survey Professional Paper 737,75 p. 1972.

BICUDO, J. R.; JAMES, A.: **Measurement of reaeration in streams: comparison of techniques.** Journal of Environmental Engineering, Vol. 115, No. 5, September/October 1989, pp. 992-1010.

CHAPRA, Steven C. **Surface Water-Quality Modeling.** McGraw-Hill Science / Engineering / Math. 1997. 844p.

CHAPRA, Steven C.; DI TORO, Dominic M. **Delta Method for estimating primary production, respiration, and reaeration in streams.** Journal of Environmental Engineering, Vol. 117, No. 5, September/October, 1991.

CHIN, David A. **Water-Quality Engineering In Natural Systems.** Wiley. 2006. 626p.

COSTA, Orlene Silva da; **Determinação Indireta do Coeficiente de Reaeração Através de Dissolução Unidimensional de Sondas de Ácido Oxálico.** XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000.

CRAWFORD, Charles G. **Determination of reaeration-rate coefficients of the Wabash River, Indiana, by the modified tracer technique.** U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 85-4290. 1985.

CUTRERA, G. *et al.* **On the determination of the kinetic parameters for the BOD test.** Short communication. ISSN 0378-4738. Water SA Vol. 25 No. 3 July 1999.

FIORUCCI, A.R.; BENEDETTI FILHO, E. **A importância do oxigênio dissolvido em ecossistemas aquáticos.** Química Nova na Escola, n. 22, p. 10-16, novembro 2005.

GLEIZER, Simone; **Determinação Experimental do Coeficiente de Reaeração em Rios com o Uso de Traçador Inerte Gasoso.** 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Maio de 1992.

GRANT, R. S.; SKAVRONECK, S. **Comparison of tracer methods and predictive equations for determination of stream-reaeration coefficients on three small streams in Wisconsin.** United States Geological Survey. Water Resources Investigation Report 80-19. 1980.

GRAY, N. F. **Biology of wastewater treatment.** Imperial College Press, 2004. 1421p.

HAMPSON, Paul S.; COFFIN, John E. **Measurement of reaeration coefficients for selected Florida streams**. U.S. Geological Survey. Water-Resource6 Investigations Report 87-4020.1989.

HREN, Janet. **Determination of reaeration coefficients for Ohio streams**. U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 84-4139. 1984.

JHA, R.; OJHA, C.S.P.; e BHATIA, K.K.S. **Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river**. Hydrol. Processes 15(6), 1047–1060. 2001.

KILPATRICK, Frederick A. *et al.* **Determination of stream reaeration coefficients by use of tracers**. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Chapter A18. Book 3 - Applications of Hydraulics. 1989.

MAIA, Guilherme Del Nero; **Análise dos Parâmetros Cinéticos no Fenômeno da Reoxigenação e Desoxigenação da Água**. 1996. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 1996.

MCBRIDE, Graham B. **Calculating Stream Reaeration Coefficients from Oxygen Profiles**. Technical Notes. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128:4(384).

MCBRIDE, Graham B.; CHAPRA, Steven C.: **Rapid Calculation of Oxygen in Streams: Approximate Delta Method**. Journal of Environmental Engineering, março 2005.

MELCHING, Charles S.; FLORES, Hala E. **Reaeration equations derived from U.S. Geological Survey database**. Journal of Environmental Engineering. May 1999.

MOOG, Douglas B.; JIRKA, Gerhard H. **Analysis of Reaeration Equations Using Mean Multiplicative Error**. Journal of Environmental Engineering, Vol. 124, No. 2, February 1998, pp. 104-110.

MORSE, Nathaniel *et al.* **Using sound pressure to estimate reaeration in streams**. Journal of The North American Benthological Society, 2007, 26(1):28–37.

OPPA, L. F. **Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do Rio Vacacaí-Mirim**. 2007. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

OPPA, L. F.; GASTALDINI, M. C. C.; MISSIO, D. **Análise da sensibilidade em modelo de qualidade da água aplicado à bacia do Rio Vacacaí Mirim/RS**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2007, São Paulo. p. 1-16.

PAIVA, João B. D.; PAIVA, Eloiza M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. 625p.



PARKER, G. W.; GAY, F. B. 'A procedure for estimating reaeration coefficients for Massachusetts streams. U.S. Geological Survey. Water Resources Investigations Report 86-4111, 1987.

RATHBUN, R.E., and GRANT, R.S., 1978, **Comparison of the radioactive and modified technique for measurement of stream reaeration coefficients** U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 78-68, 57 p.

RATHBUN, R.E.; SHULTZ, D.J.; STEPHENS, D.W. **Preliminary experiments with a modified tracer technique for measuring stream reaeration coefficients**. U.S. Geological Survey Open-File Report 75-256, 36 p. 1975.

ROLDÃO, J.S.F. **Apraisal Of The  $^{85}\text{Kr}$  and Propane Methods to Determine Reaeration Rate Coefficients in Large Rivers**. Advisory Group Meeting on the Application of Artificial Tracers in Hidrology – I.A.E.A., TECDOC-601, Vienna (Austria), March 1990, pp. 45-49.

SCHULZ, H.E. **Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície**. 1985. 299p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 1985.

STAMER, J. K.; BENNETT, J. P.; MCKENZIE, S. W. **Determination of ultimate carbonaceous BOD and the specific rate constant ( $K_1$ )**. U.S. Geological Survey. Open-File Report 82-645. 1983.

STEDFAST, David A.; RICHARD E. Draper. **Reaeration coefficients of six streams in New York**. U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 85-4028. 1986.

TSIVOGLU, E.C., O'CONNELL, R.L., WALTER, C.M., GODSIL, P.J., and LOGSDON, G.S. **Tracer measurements of atmospheric reaeration, I. Laboratory studies**. Journal Water Pollution Control Federation, v. 37, no. 10, p. 1343-1362. 1965.

TSIVOGLU, E.C., and WALLACE, J.R. **Characterizing stream reaeration capacity**. Rep. No. EPA-R3-72-012, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 1972.

TSIVOGLU, E.C., and NEAL, L.A. **Tracer measurement of reaeration. III. Predicting the reaeration capacity of inland streams**. J. Water Pollution Control Fedn., 48(12), 2669–2689. 1976.

VON SPERLING, Marcos. **Determinação do coeficiente de reaeração de cursos d'água ( $K_2$ ) utilizando fórmulas empíricas**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande. Anais eletrônicos... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005-A.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG. 2005-B. 452 p.

WILSON, James F.; COBB, Ernest D.; KILPATRICK, Frederick A. **Fluorometric procedures for dye tracing**. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Chapter A12. Book 3 - Applications of Hydraulics. 1986.

YOTSUKURA, N. *et al.* **An assessment of steady-state propane-gas tracer method for reaeration coefficients - Cowaselon Creek, New York**. U.S. Geological Survey. Water Resources Investigations 83-4183, 88 p. 1983.

## APÊNDICES

**APÊNDICE 1 – Dados experimentais do primeiro teste com o traçador Rodamina WT: 18/08/2010**

Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 18/08/2010 – Seção R1			
Horário	Tempo após injeção (min)	Fluorescência	Concentração (ppb)
10:05	84	< 0,7	0,00
10:10	89	3,46	3,44
10:15	94	15,20	17,04
10:20	99	37,52	42,91
10:25	104	63,29	72,78
10:30	109	73,76	84,91
10:35	114	85,01	97,95
10:40	119	86,53	99,71
10:45	124	83,01	95,63
10:50	129	78,00	89,83
10:55	134	72,45	83,40
11:00	139	67,35	77,48
11:05	144	62,09	71,39
11:10	149	57,96	66,60
11:15	154	52,17	59,89
11:20	159	49,83	57,18
11:25	164	42,61	48,81
11:30	169	36,72	41,98
11:35	174	33,33	38,06
11:40	179	30,92	35,26
11:45	184	28,85	32,86
11:50	189	24,37	27,67
11:55	194	21,26	24,07
12:00	199	18,39	20,74
12:05	204		17,19*
12:10	209		13,65*
12:15	214		10,11*
12:20	219		6,57*
12:25	224		3,03*
12:40	239		0,00*

\* Valores estimados

**APÊNDICE 2 – Dados experimentais do segundo teste com o traçador Rodamina WT: 10/09/2010**

Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 10/09/2010 - Seção R1			
Horário	Tempo após injeção (min)	Fluorescência	Concentração (ppb)
8:29	10	< 0,7	0,00
8:32	13	1,547	1,22
8:34	15	37,98	43,44
8:35	16	62,46	71,82
8:37	18	56	64,33
8:38	19	45,5	52,16
8:39	20	37,54	42,93
8:40	21	32,23	36,78
8:41	22	29,06	33,11
8:42	23	23	26,08
8:44	25	17,35	19,53
8:46	27	12,48	13,89
8:48	29	8,921	9,77
8:51	32	5,98	6,36
8:54	35	3,607	3,61
8:57	38	2,704	2,56
9:02	43	1,603	1,28
9:07	48	1,224	0,84
9:12	53	< 0,7	0,00

Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 10/09/2010 – Seção R2			
Horário	Tempo após injeção (min)	Fluorescência	Concentração (ppb)
11:51	212	0,789	0,34
12:00	221	1,201	0,82
12:05	226	1,391	1,04
12:10	231	1,746	1,45
12:15	236	2,014	1,76
12:20	241	2,335	2,13
12:25	246	2,562	2,40
12:30	251	2,734	2,59
12:35	256	2,951	2,85
12:40	261	3,336	3,29
12:45	266	3,499	3,48
12:50	271	3,802	3,83
12:55	276	3,774	3,80
13:00	281	3,993	4,05
13:05	286	4,161	4,25
13:10	291	4,245	4,35
13:15	296	4,066	4,14
13:20	301	3,948	4,00
13:25	306	3,879	3,92
13:30	311	3,85	3,89
13:35	316	3,716	3,73
13:40	321		3,61*
13:45	326		3,40*
13:50	331		3,27*
13:55	336		3,13*
14:00	341		2,74*
14:05	346		2,64*
14:10	351		2,39*
14:15	356		2,30*
14:20	361		2,22*
14:25	366		1,96*
14:30	371		1,78*
14:35	376		1,57*
14:40	381		1,36*
14:45	386		1,11*
14:50	391	1,357	1,00
14:55	396	1,279	0,91
15:00	401	1,08	0,68
15:05	406	1,032	0,62
15:10	411	1,004	0,59
15:15	416	0,898	0,47
15:20	421	0,905	0,47
15:30	431	0,703	0,24
15:40	441	0,64	0,17

\* Valores estimados

### APÊNDICE 3 – Dados experimentais do primeiro ensaio de determinação do coeficiente de reaeração superficial: 17/09/2010

Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 17/09/2010 – Seção R1			
Horário	Tempo após injeção (min)	Fluorescência	Concentração (ppb)
9:03	3	< 0,7	0,00
9:04	4	0,944	0,52
9:05	5	0,904	0,47
9:06	6	19,86	22,44
9:07	7	62,3	71,63
9:08	8	50,12	57,52
9:09	9	23,94	27,17
9:10	10	16,29	18,31
9:11	11	11,53	12,79
9:12	12	7,556	8,18
9:13	13	5,902	6,27
9:15	15	3,169	3,10
9:17	17	2,337	2,13
9:19	19	1,724	1,42
9:21	21	1,236	0,86
9:23	23	0,907	0,48
9:24	24	< 0,7	0,00

Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 17/09/2010 – Seção R2			
Horário	Tempo após injeção (min)	Fluorescência	Concentração (ppb)
9:12	12	< 0,7	0,00
9:13	13	0,826	0,38
9:16	16	0,831	0,39
9:19	19	2,955	2,85
9:20	20	7,185	7,75
9:21	21	11,230	12,44
9:22	22	14,460	16,19
9:23	23	16,610	18,68
9:24	24	16,520	18,57
9:25	25	15,530	17,43
9:26	26	14,070	15,73
9:27	27	12,500	13,91
9:28	28	10,920	12,08
9:29	29	9,649	10,61
9:30	30	8,286	9,03
9:31	31	6,758	7,26
9:32	32	6,110	6,51
9:33	33	5,569	5,88
9:34	34	4,711	4,89
9:35	35	3,996	4,06
9:37	37	3,523	3,51
9:39	39	2,456	2,27
9:41	41	2,043	1,79
9:43	43	1,747	1,45
9:45	45	1,480	1,14
9:47	47	1,330	0,97
9:49	49	1,164	0,78
9:51	51	1,186	0,80
9:53	53	1,198	0,81
9:55	55	1,117	0,72
9:59	59	0,886	0,45
10:05	65	0,795	0,35
10:10	70	0,735	0,28
10:11	75	< 0,7	0,00

Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 17/09/2010 – Seção R3			
Horário	Tempo após injeção (min)	Fluorescência	Concentração (ppb)
10:30	86		0*
10:32	88		0,20*
10:34	91		0,70*
10:36	94		1,50*
10:38	97		2,50*
10:40	100	4,006	4,07
10:43	103	5,98	6,36
10:45	105	6,2	6,61
10:47	107	6,237	6,65
10:49	109	6,025	6,41
10:51	111	5,55	5,86
10:53	113	5,197	5,45
10:55	115	4,685	4,86
10:57	117	4,401	4,53
10:59	119	4,162	4,25
11:01	121	3,681	3,69
11:03	123	3,258	3,20
11:05	125	2,91	2,80
11:07	127	2,703	2,56
11:09	129	2,397	2,20
11:11	131	2,151	1,92
11:14	134	1,719	1,42
11:16	136	1,681	1,37
11:18	138	1,39	1,04
11:21	141	1,292	0,92
11:26	146	1,095	0,70
11:29	149	1,02	0,61
11:34	154	0,716	0,26
11:35	164	< 0,7	0,00

\* Valores estimados

Curva de passagem de Propano: experimento 17/09/2010 – Seções R1, R2 e R3				
Seção	Horário	Tempo após início da injeção (min)	Concentração (ppb)	Média do patamar (ppb)
R1	9:35	35	7,01	7,21
R1	9:40	40	7,47	
R1	9:45	45	6,73	
R1	9:50	50	7,64	
R2	10:05	65	4,23	5,40
R2	10:10	70	6,17	
R2	10:15	75	4,70	
R2	10:20	80	6,52	
R3	11:32	152	1,90	1,83
R3	11:37	157	1,90	
R3	11:42	162	1,70	

**APÊNDICE 4 – Dados experimentais do segundo ensaio de determinação do coeficiente de reaeração superficial: 05/10/2010**

Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 05/10/2010 – Seção R1			
Horário	Tempo após injeção (min)	Fluorescência	Concentração (ppb)
9:11	16	< 0,7	0,00
9:13	18	0,884	0,45
9:15	20	1,743	1,45
9:17	22	27,78	31,62
9:18	23	47,64	54,64
9:19	24	103,8	119,73
9:20	25	112,8	130,16
9:21	26	120,1	138,62
9:22	27	114,1	131,67
9:23	28	106,8	123,21
9:24	29	102,2	117,88
9:26	31	82,4	94,93
9:28	33	66,14	76,08
9:30	35	50,21	57,62
9:33	38	35,68	40,78
9:36	41	24,94	28,33
9:39	44	18,5	20,87
9:43	48	12,05	13,39
9:48	53	7,662	8,31
9:53	58	4,389	4,51
9:58	63	3,346	3,30
10:03	68	2,882	2,77
10:09	74	1,908	1,64
10:14	79	1,313	0,95
10:19	84	< 0,7	0,00

Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 05/10/2010 – Seção R2			
Horário	Tempo após injeção (min)	Fluorescência	Concentração (ppb)
10:00	65	< 0,7	0,00
10:05	70	1,53	1,20
10:10	75	4,414	4,54
10:14	79	10,46	11,55
10:16	81	13,17	14,69
10:18	83	16,83	18,93
10:19	84	17,58	19,80
10:20	85	20,62	23,32
10:21	86	21,18	23,97
10:22	87	22,51	25,52
10:23	88	24,39	27,69
10:24	89	25,59	29,08
10:25	90	26,16	29,75
10:26	91	26,44	30,07
10:28	93	27,67	31,50
10:29	94	28,49	32,45
10:30	95	27,17	30,92
10:31	96	27,31	31,08
10:32	97	28,26	32,18
10:33	98	27,63	31,45
10:35	100	27,56	31,37
10:37	102	26,33	29,94
10:39	104	25,53	29,02
10:41	106	23,56	26,73
10:43	108	22,53	25,54
10:45	110	21,24	24,04
10:53	118	18,12	20,43
10:56	121	16,03	18,00
10:59	124	14,18	15,86
11:04	129	11,74	13,03
11:09	134	10,17	11,21
11:14	139	8,512	9,29
11:19	144	7,312	7,90
11:24	149	6,235	6,65
11:29	154	5,428	5,72
11:34	159	4,49	4,63
11:39	164	4,007	4,07
11:49	174	2,976	2,88
11:59	184	2,324	2,12
12:09	194	1,77	1,48
12:19	204	1,228	0,85
12:29	214	1,005	0,59
12:39	224	< 0,7	0,00

## Continuação

Curva de passagem de Rodamina WT: experimento 05/10/2010 – Seção R3			
Horário	Tempo após injeção (min)	Fluorescência	Concentração (ppb)
14:07	312	< 0,7	0,00
14:17	322	1,096	0,70
14:20	325	1,271	0,90
14:23	328	1,424	1,08
14:26	331	1,478	1,14
14:32	337	1,988	1,73
14:37	342	2,254	2,04
14:42	347	2,661	2,51
14:47	352	3,102	3,02
14:52	357	3,58	3,58
14:57	362	3,994	4,06
15:02	367	4,878	5,08
15:07	372	5,108	5,35
15:12	377	5,492	5,79
15:17	382	5,972	6,35
15:22	387	6,333	6,77
15:27	392	6,287	6,71
15:32	397	6,533	7,00
15:37	402	6,916	7,44
15:42	407	6,733	7,23
15:47	412	6,746	7,24
15:52	417	6,995	7,53
15:57	422	6,711	7,20
16:07	432	6,707	7,20
16:17	442	6,568	7,04
16:27	452	6,201	6,61
16:37	462	5,639	5,96
16:47	472	5,048	5,28
16:57	482	4,812	5,00
17:07	492	4,328	4,44
17:17	502	3,863	3,90
17:27	512	3,408	3,38
17:42	527	2,994	2,90
17:55	540	2,712	2,57
18:05	550		2,32*
18:15	560		2,09*
18:25	570		1,85*
18:35	580		1,57*
18:45	590		1,39*
18:55	600		1,04*
19:05	610		0,93*
19:15	620		0,70*
19:25	630		0,00*

\* Valores estimados

Curva de passagem de Propano: experimento 05/10/2010 – Seções R1, R2 e R3				
Seção	Horário	Tempo após início da injeção (min)	Concentração (ppb)	Média do patamar (ppb)
R1	10:30	95	66,19	59,47
R1	10:38	103	55,85	
R1	10:41	106	56,38	
R2	12:11	196	35,23	32,63
R2	12:15	200	24,10	
R2	12:19	204	35,78	
R2	12:28	213	35,41	
R3	17:44	529	3,14	3,19
R3	17:48	533	3,32	
R3	17:53	538	3,15	
R3	17:58	543	3,14	



## APÊNDICE 5 – Dados experimentais para a construção da curva de decaimento de oxigênio dissolvido: experimento 11/03/2010

Curva de decaimento de oxigênio: experimento 11/03/2010 - Seção D1					
Data	Horário	Tempo (dias)	OD (mg/L)	DBO exercida observada (mg/L)	DBO exercida calculada (mg/L)
11/3/2010	12:40	0,00	15,82	0,00	0,00
12/3/2010	13:20	1,03	12,90	2,92	3,01
13/3/2010	16:00	2,14	16,96	5,50*	5,53
14/3/2010	16:45	3,17	9,15	6,67	7,34
15/3/2010	14:00	4,06	6,80	9,02	8,57
16/3/2010	14:15	5,07	6,25	9,57	9,69
17/3/2010	14:40	6,08	5,30	10,52	10,57
18/3/2010	11:20	6,94	4,62	11,20	11,17
22/3/2010	15:00	11,10	2,68	13,14	12,80
25/3/2010	15:00	14,10	2,04	13,78	13,29
29/3/2010	14:10	18,06	1,87	13,95	13,58
31/3/2010	12:40	20,00	2,06	13,76	13,65

Curva de decaimento de oxigênio: experimento 11/03/2010 - Seção D2					
Data	Horário	Tempo (dias)	OD (mg/L)	DBO exercida observada (mg/L)	DBO exercida calculada (mg/L)
11/3/2010	12:40	0,00	7,75	0,00	0,00
12/3/2010	13:20	1,03	7,00	0,75	0,48
13/3/2010	16:00	2,14	9,01	1,10*	0,92
14/3/2010	16:45	3,17	6,33	1,42	1,27
15/3/2010	14:00	4,06	6,31	1,44	1,53
16/3/2010	14:15	5,07	6,45	1,30	1,79
17/3/2010	14:40	6,08	6,12	1,63	2,02
18/3/2010	11:20	6,94	5,55	2,20	2,19
22/3/2010	15:00	11,10	4,42	3,33	2,75
25/3/2010	15:00	14,10	4,66	3,09	2,99
29/3/2010	14:10	18,06	4,65	3,10	3,18
31/3/2010	12:40	20,00	4,33	3,42	3,24

Curva de decaimento de oxigênio: experimento 11/03/2010 - Seção D3					
Data	Horário	Tempo (dias)	OD (mg/L)	DBO exercida observada (mg/L)	DBO exercida calculada (mg/L)
11/3/2010	12:40	0,00	7,66	0,00	0,00
12/3/2010	13:20	1,03	7,68	0,20	0,18
13/3/2010	16:00	2,14	8,88	0,40	0,34
14/3/2010	16:45	3,17	7,10	0,56	0,47
15/3/2010	14:00	4,06	7,06	0,60	0,57
16/3/2010	14:15	5,07	7,07	0,59	0,66
17/3/2010	14:40	6,08	6,95	0,71	0,74
18/3/2010	11:20	6,94	6,78	0,88	0,80
22/3/2010	15:00	11,10	6,74	0,92	1,00
25/3/2010	15:00	14,10	6,57	1,09	1,08
29/3/2010	14:10	18,06	6,68	0,98	1,15
31/3/2010	12:40	20,00	6,44	1,22	1,16

\* Valores estimados

**APÊNDICE 6 – Dados experimentais para a construção da curva de decaimento de oxigênio dissolvido: experimento 07/04/2010**

Curva de decaimento de oxigênio: experimento 07/04/2010 - Seção D1					
Data	Horário	Tempo (dias)	OD (mg/L)	DBO exercida observada (mg/L)	DBO exercida calculada (mg/L)
7/4/2010	17:00	0,00	33,29	0,00	0,00
8/4/2010	16:00	0,96	25,48	7,81	5,82
9/4/2010	16:30	1,98	20,55	12,74	10,80
10/4/2010	18:30	3,06	17,83	15,46	15,00
11/4/2010	16:00	3,96	14,91	18,38	17,79
12/4/2010	15:30	4,94	13,42	19,87	20,27
13/4/2010	16:00	5,96	12,25	21,04	22,35
15/4/2010	16:30	7,98	10,45	22,84	25,31
19/4/2010	15:50	11,95	4,56	28,73	28,39
23/4/2010	12:00	15,79	3,48	29,81	29,64
27/4/2010	17:00	20,00	2,70	30,59	30,22

Curva de decaimento de oxigênio: experimento 07/04/2010 - Seção D2					
Data	Horário	Tempo (dias)	OD (mg/L)	DBO exercida observada (mg/L)	DBO exercida calculada (mg/L)
7/4/2010	17:00	0,00	8,25	0,00	0,00
8/4/2010	16:00	0,96	7,30	0,95	0,69
9/4/2010	16:30	1,98	6,83	1,42	1,32
10/4/2010	18:30	3,06	6,65	1,60	1,88
11/4/2010	16:00	3,96	6,01	2,24	2,27
12/4/2010	15:30	4,94	5,20	3,05	2,64
13/4/2010	16:00	5,96	5,33	2,92	2,96
15/4/2010	16:30	7,98	5,20	3,05	3,46
19/4/2010	15:50	11,95	4,10	4,15	4,07
23/4/2010	12:00	15,79	3,81	4,44	4,38
27/4/2010	17:00	20,00	3,53	4,72	4,55

Curva de decaimento de oxigênio: experimento 07/04/2010 - Seção D3					
Data	Horário	Tempo (dias)	OD (mg/L)	DBO exercida observada (mg/L)	DBO exercida calculada (mg/L)
7/4/2010	17:00	0,00	8,46	0,00	0,00
8/4/2010	16:00	0,96	7,89	0,57	0,41
9/4/2010	16:30	1,98	7,75	0,71	0,78
10/4/2010	18:30	3,06	7,82	0,64	1,10
11/4/2010	16:00	3,96	7,33	1,13	1,33
12/4/2010	15:30	4,94	6,60	1,86	1,54
13/4/2010	16:00	5,96	6,80	1,66	1,72
15/4/2010	16:30	7,98	6,30	2,16	2,00
19/4/2010	15:50	11,95	5,99	2,47	2,33
23/4/2010	12:00	15,79	5,90	2,56	2,49
27/4/2010	17:00	20,00	6,08	2,65	2,57

**APÊNDICE 7 – Dados experimentais para a construção da curva de decaimento de oxigênio dissolvido: experimento 27/04/2010**

<b>Curva de decaimento de oxigênio: experimento 27/04/2010 - Seção D1</b>					
<b>Data</b>	<b>Horário</b>	<b>Tempo (dias)</b>	<b>OD (mg/L)</b>	<b>DBO exercida observada (mg/L)</b>	<b>DBO exercida calculada (mg/L)</b>
27/4/2010	18:30	0,00	25,32	0,00	0,00
28/4/2010	16:15	0,91	21,33	3,99	4,30
29/4/2010	16:50	1,93	17,93	7,39	8,18
1/5/2010	17:15	3,95	11,24	14,08	13,57
3/5/2010	15:15	5,86	8,54	16,78	16,80
4/5/2010	15:45	6,89	6,85	18,47	18,01
7/5/2010	14:00	9,81	5,19	20,13	20,23
10/5/2010	14:40	12,84	4,09	21,23	21,37
14/5/2010	15:00	16,85	3,46	21,86	22,05
17/5/2010	18:30	20,00	2,84	22,48	22,27

<b>Curva de decaimento de oxigênio: experimento 27/04/2010 - Seção D2</b>					
<b>Data</b>	<b>Horário</b>	<b>Tempo (dias)</b>	<b>OD (mg/L)</b>	<b>DBO exercida observada (mg/L)</b>	<b>DBO exercida calculada (mg/L)</b>
27/4/2010	18:30	0,00	8,72	0,00	0,00
28/4/2010	16:15	0,91	7,86	0,86	0,86
29/4/2010	16:50	1,93	7,08	1,64	1,62
1/5/2010	17:15	3,95	6,17	2,55	2,62
3/5/2010	15:15	5,86	5,51	3,21	3,18
4/5/2010	15:45	6,89	5,27	3,45	3,38
7/5/2010	14:00	9,81	4,98	3,74	3,73
10/5/2010	14:40	12,84	4,90	3,82	3,89
14/5/2010	15:00	16,85	4,87	3,85	3,98
17/5/2010	18:30	20,00	4,70	4,02	4,00

<b>Curva de decaimento de oxigênio: experimento 27/04/2010 - Seção D3</b>					
<b>Data</b>	<b>Horário</b>	<b>Tempo (dias)</b>	<b>OD (mg/L)</b>	<b>DBO exercida observada (mg/L)</b>	<b>DBO exercida calculada (mg/L)</b>
27/4/2010	18:30	0,00	8,79	0,00	0,00
28/4/2010	16:15	0,91	7,99	0,80	0,63
29/4/2010	16:50	1,93	7,76	1,03	1,20
1/5/2010	17:15	3,95	6,57	2,22	2,03
3/5/2010	15:15	5,86	6,06	2,73	2,55
4/5/2010	15:45	6,89	6,22	2,57	2,75
7/5/2010	14:00	9,81	5,90	2,89	3,14
10/5/2010	14:40	12,84	5,40	3,39	3,35
14/5/2010	15:00	16,85	5,24	3,55	3,49
17/5/2010	18:30	20,00	5,20	3,59	3,54