

APLICAÇÃO DO MÉTODO DELTA APROXIMADO PARA DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO NO RIO VACACAÍ MIRIM

Lauren Ávila^{1}; Maria do Carmo Gastaldini²; Vinicius Kuchinski³*

Resumo – O coeficiente de reaeração (K_2) é um importante parâmetro para as respostas de modelos matemáticos de qualidade da água. Para prever o K_2 existem equações na literatura, porém recomenda-se o uso de métodos experimentais para a sua avaliação. O objetivo do trabalho foi determinar experimentalmente o K_2 , para o rio Vacacaí Mirim, através do Método Delta Aproximado e realizar a comparação de valores entre os resultados das equações. Foram determinados o oxigênio dissolvido, através de um oxímetro, e as características hidrodinâmicas do corpo hídrico. Resultados demonstram que o rio apresenta baixas vazões, com valores baixos de oxigênio dissolvido. O método experimental mostrou-se eficiente para a determinação do K_2 e as formulações obtiveram resultados muito divergentes, afirmando que são válidas somente para as condições de escoamento onde foram obtidas.

Palavras-Chave – oxigênio dissolvido; modelos matemáticos; qualidade da água.

APPLICATION OF THE APPROXIMATE DELTA METHOD FOR EXPERIMENTAL DETERMINATION OF REAERATION COEFFICIENT IN RIVER VACACAÍ MIRIM

Abstract – The reaeration coefficient (K_2) is an important parameter for the answers to mathematical models of water quality. To predict the K_2 exist equations in the literature, but we recommend the use of experimental methods for their evaluation. The objective was to determine experimentally the K_2 , of the river Vacacaí Mirim, through the Approximate Delta Method and perform the comparison of values between the results of the equations. Were determined the dissolved oxygen, through an oximeter, and hydrodynamic characteristics of the water body. Results show that the river has low flow, with low levels of dissolved oxygen. The experimental method was efficient for the determination of K_2 and the formulations obtained widely varying results, stating that they are valid only for the flow conditions which were obtained.

Keywords – dissolved oxygen; mathematical models; water quality.

¹ Mestranda no programa de pós-graduação em Engenharia Civil, área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – Universidade Federal de Santa Maria. Email: laurenavila@ymail.com

² Professora doutora junto ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: mcarmocg@gmail.com

³ Aluno da graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: viniciuss@gmail.com

INTRODUÇÃO

A busca por alternativas para a solução dos problemas quali-quantitativos dos recursos hídricos, sem impedir o desenvolvimento econômico, é assunto essencial para os usuários da água. Para auxiliar na gestão, controle e proteção dos recursos hídricos podem ser utilizadas ferramentas que possibilitem a análise e prognóstico dos mesmos. Os modelos matemáticos de qualidade da água são utilizados para esses fins. Para que tais ferramentas sejam eficientes deve-se dispor de resultados confiáveis de monitoramentos, além de seguir as etapas da modelagem.

Estudos demonstram grande influência do coeficiente de reaeração (K_2) nas respostas de modelos matemáticos de qualidade da água. Existe na literatura grande quantidade de fórmulas para prever o coeficiente de reaeração, porém não passam de formulações semi-empíricas válidas para as condições particulares dos escoamentos onde foram obtidas e seus resultados divergem significativamente. Com a incerteza gerada, torna-se recomendável a avaliação experimental do coeficiente de reaeração.

Entre vários métodos de avaliação experimental do coeficiente de reaeração, o método dos traçadores é o mais confiável, porém é um método sofisticado que necessita numerosa equipe de trabalho e implica custos elevados. Já o método delta aproximado é de fácil obtenção dos dados, além disso, há poucos estudos de aplicação desse método.

Objetivou-se determinar experimentalmente o coeficiente de reaeração em um trecho do rio Vacacaí Mirim, através do método delta aproximado, além de determinar as características hidrodinâmicas do corpo hídrico e, por fim, comparar valores do coeficiente de reaeração obtidos experimentalmente com os dos resultados das equações propostas na bibliografia.

REVISÃO DE LITERATURA

A reaeração é a transferência de gás que ocorre na fronteira entre a superfície da água e do ar atmosférico e é a principal fonte de introdução de oxigênio em um corpo hídrico. Essa transferência ocorre por uma reação de difusão em que a taxa de transferência depende da concentração relativa do oxigênio no ar e na água (Braga et al., 2005).

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 (OD). O coeficiente de reaeração pode ser determinado através de métodos experimentais ou através de fórmulas presentes na literatura (Melching e Flores, 1999).

A técnica dos traçadores gasosos tem sido empregada utilizando-se dois procedimentos de campo: o método de injeção de curta duração do gás, em que o gás e o traçador conservativo são injetados simultaneamente a taxa constante com idêntica duração; e o método de injeção de longa duração do gás, em que o traçador conservativo é injetado instantaneamente no início da injeção do gás (Rathbun, 1978; Hampson, 1989; Formentini e Gastaldini, 2010).

O método delta para a determinação do coeficiente de reaeração foi 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 taxa fotossintética baseado na variação diária

de oxigênio dissolvido num corpo d'água. 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, Mc Bride 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 (1991).

O método delta aproximado baseia-se na estimativa da taxa de reaeração, produção primária e taxa de respiração basicamente através 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 taxa de reaeração. Uma vez obtido o coeficiente de reaeração, a variação de déficit é utilizada para prever a produção fotossintética. Finalmente, o déficit médio pode ser utilizado em conjunto com as taxas de reaeração e produção para computar a respiração. Este modelo é uma aproximação através da relação entre parâmetros do modelo original e manipulação de equações para construção de curvas semelhantes. A solução encontrada é obtida através da equação 1:

$$K_2 = 7,5 \cdot \left(\frac{5,3 \cdot \eta - \emptyset}{\eta \cdot \emptyset} \right)^{0,85} \quad (1)$$

Sendo:

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

η = fator de correção do fotoperíodo (adimensional);

f = duração do fotoperíodo (h);

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

As equações mais utilizadas para previsão do coeficiente de reaeração estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Equações de determinação do K_2

Autor(es)	$K_2(d^{-1} \text{ a } 20^\circ\text{C})$	Faixa de aplicação
O'Connor e Dobbins (1958)	$3,95 \cdot \frac{U^{0,5}}{H^{1,5}}$	$0,6\text{m} \leq H < 4,0\text{m}$ $0,05\text{m/s} \leq U < 0,8\text{m/s}$
Churchill <i>et al.</i> (1962)	$5,03 \cdot \frac{U^{0,969}}{H^{1,673}}$	$0,6\text{m} \leq H < 4,0\text{m}$ $0,8\text{m/s} \leq U < 1,5\text{m/s}$
Owens <i>et al.</i> (1964)	$5,34 \cdot \frac{U^{0,67}}{H^{1,85}}$	$0,1\text{m} \leq H < 0,6\text{m}$ $0,05\text{m/s} \leq U < 1,5\text{m/s}$
Langbien e Durum (1967)	$5,13 \cdot \frac{U}{H^{1,33}}$	-

U = velocidade média; H = profundidade média.

Fonte: Adaptado de Chapra, 1997

METODOLOGIA

O trabalho foi realizado no rio Vacacaí Mirim, cuja bacia hidrográfica está localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul, com área de 1120km², abrangendo os municípios de Santa Maria, Restinga Seca, Itaara, São João do Polesine e Silveira Martins. 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.

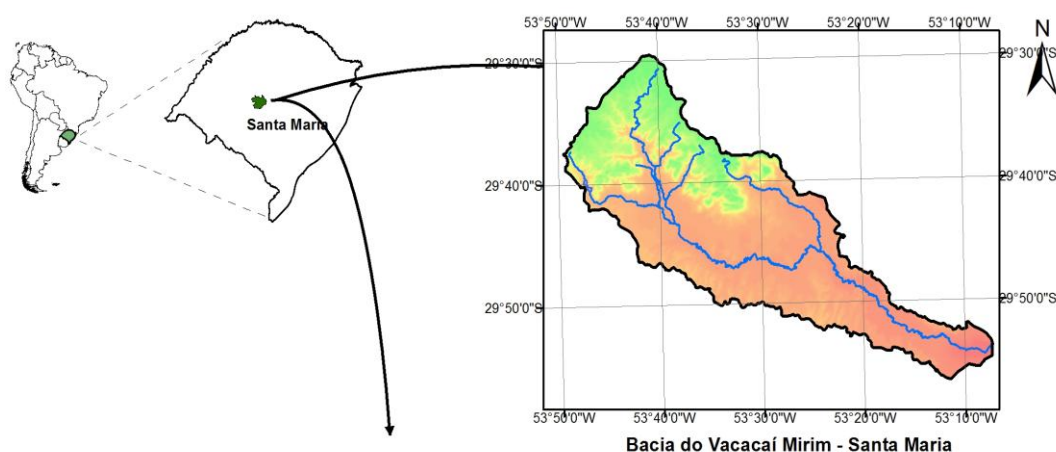


Figura 1. Mapa localização dos pontos de monitoramento

As vazões foram determinadas nas seções de amostragem por meio da medição da velocidade, utilizando-se um molinete. Posteriormente, foram calculadas as vazões correspondentes, utilizando o método da seção média (Santos *et al*, 2001). A profundidade média foi calculada pelo quociente da área molhada da seção pela largura superficial.

Utilizou-se do método delta aproximado proposto por Mc Bride e Chapra (2005) para determinar o coeficiente de reaeração. Foi necessário fazer a avaliação da concentração de oxigênio dissolvido utilizando-se um oxímetro, durante o fotoperíodo. A duração do fotoperíodo e o horário do meio dia solar foram obtidos da estação meteorológica pertencente ao 8° Distrito de Meteorologia (8° DISME) do Ministério da Agricultura (Instituto Nacional de Meteorologia - INMET), localizada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Com os valores das concentrações de oxigênio dissolvido obtidas pelo oxímetro e com os dados da estação meteorológica, foi calculado o coeficiente de reaeração através da equação 1.

Com os resultados do coeficiente de reaeração determinados experimentalmente através do método delta aproximado, será feita uma comparação com os resultados de K_2 obtidos com as equações propostas pela literatura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de vazão, velocidade, profundidade e largura, referente às características hidrodinâmicas do rio Vacacaí Mirim, estão inseridos na tabela 2. A vazão do rio Vacacaí Mirim é

considerada uma vazão pequena, afetada diretamente pela profundidade e largura (área) e também pela velocidade. As medidas da seção transversal do ponto 1 e 2 são muito parecidas, já no ponto 3 elas são maiores porém a velocidade nesse ponto é menor, o que torna a vazão praticamente a mesma no trecho do rio.

Tabela 2. Características hidrodinâmicas do corpo hídrico

Ponto de monitoramento	Data	Vazão (m ³ /s)	Velocidade (m/s)	Profundidade (m)	Largura (m)
1	24/04/2012	0,0292	0,2513	0,068	1,7
	04/06/2012	0,023	0,1178	0,0975	2
	22/08/2012	0,0253	0,1362	0,0775	2,4
	25/10/2012	1,0507	0,8683	0,275	4,4
2	25/07/2012	0,0579	0,3014	0,088	2,4
	23/08/2012	0,0727	0,1821	0,114	3,5
	04/09/2012	0,0435	0,1225	0,142	2,5
3	26/07/2012	0,5297	0,0618	0,857	10
	05/09/2012	0,3549	0,0437	0,7391	11

Os dados relativos à determinação experimental do oxigênio dissolvido, através do oxímetro e os dados de coeficiente de reaeração através do método Delta, estão descritos na tabela 3. Através desses valores, percebe-se que embora o fenômeno de reaeração atmosférica seja o principal mecanismo de absorção de OD em um corpo hídrico, existem outros mecanismos que também afetam seu valor. Nota-se essa influência de outro mecanismo, quando há uma diminuição no valor do K₂, porém um aumento do valor de OD.

Tabela 3. Valores de OD e K₂ determinados experimentalmente

Pontos de monitoramento	Data	OD (mg/L)	K ₂ (dia ⁻¹)
1	24/04/2012	3,86	81,17
	04/06/2012	5,7	44,38
	22/08/2012	3,42	28,34
	25/10/2012	9,01	77,10
2	25/07/2012	4,54	36,05
	23/08/2012	1,61	39,10
	04/09/2012	4,15	21,32
3	26/07/2012	6,53	15,92
	05/09/2012	5,39	13,53

Nas figuras 2, 3 e 4 são apresentados os valores de oxigênio dissolvido observados durante o fotoperíodo, através de um oxímetro, para os pontos 1, 2 e 3 respectivamente.

Conforme análise dos gráficos verifica-se que o oxigênio dissolvido comportou-se de maneira esperada, tendo em vista a teoria do método Delta. Ou seja, nos primeiros horários do dia o valor de OD é menor e esse valor vai subindo até chegar ao seu pico, perto do meio dia, e novamente decai, obtendo-se uma curva ascendente. Essa curva deve-se ao fato de que nos primeiros horários do dia a incidência solar é menor e, conseqüentemente, a produção aquática de oxigênio é menor (pois o fator sola afeta diretamente na produção aquática, pela fotossíntese). Conforme vai aumentando a incidência solar, a produção de oxigênio pelas plantas aumenta até o pico solar que é perto do meio dia. A respiração das plantas (consumo de oxigênio) não tem alteração durante o dia.

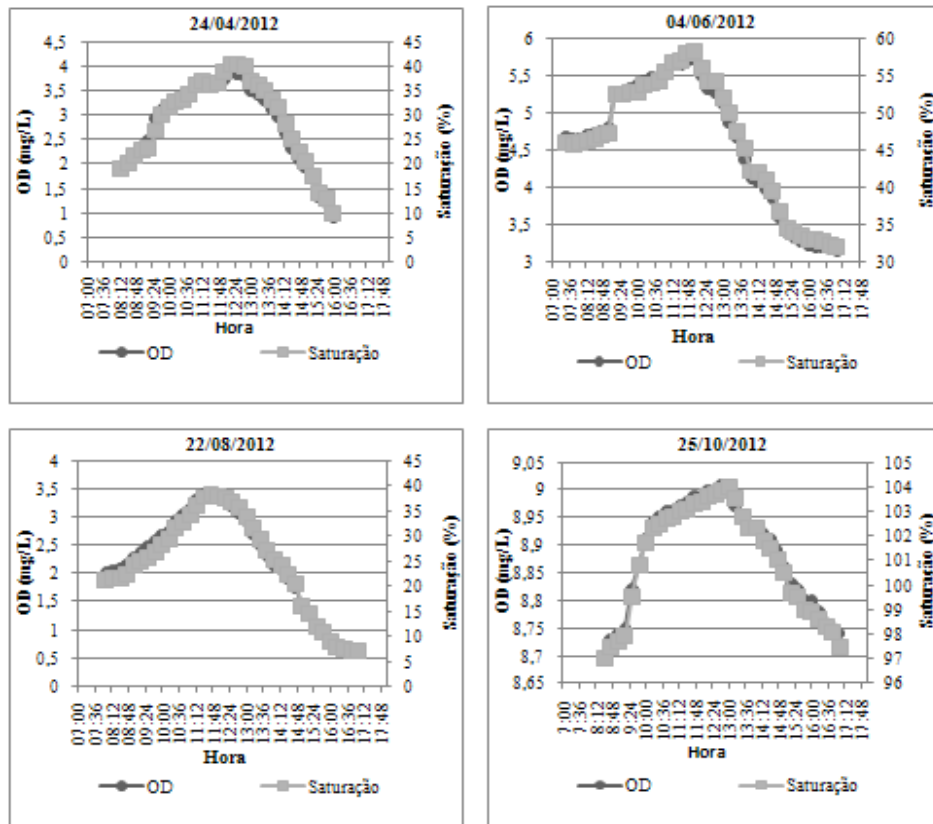


Figura 2 – Valores de Oxigênio dissolvido durante o fotoperíodo – ponto 1

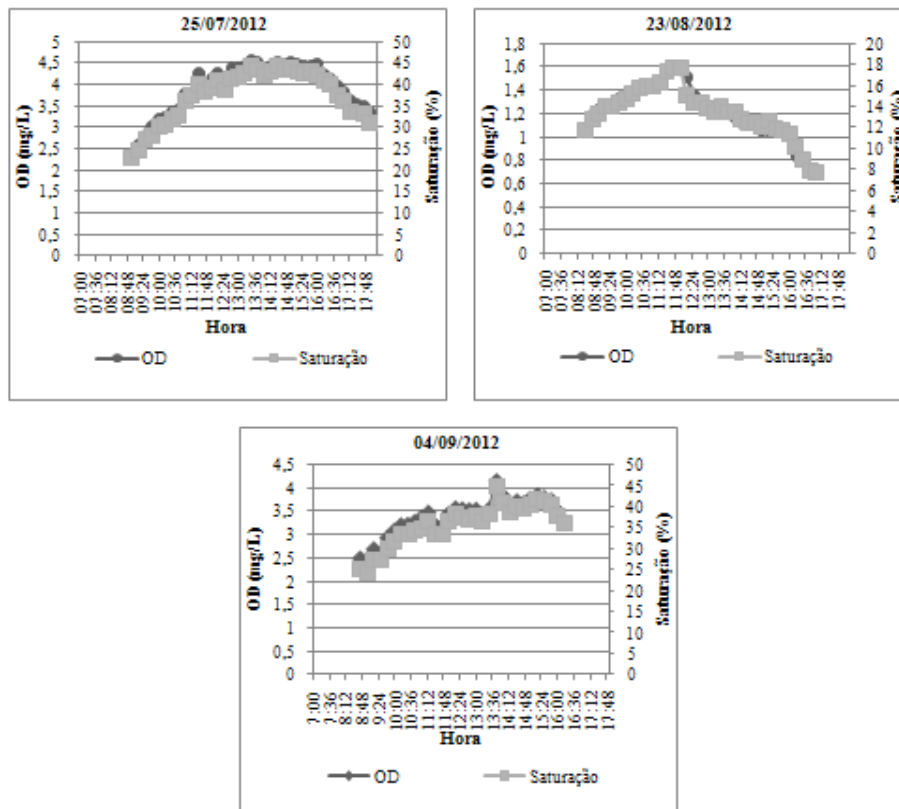


Figura 3 – Valores de OD durante o fotoperíodo – ponto 2

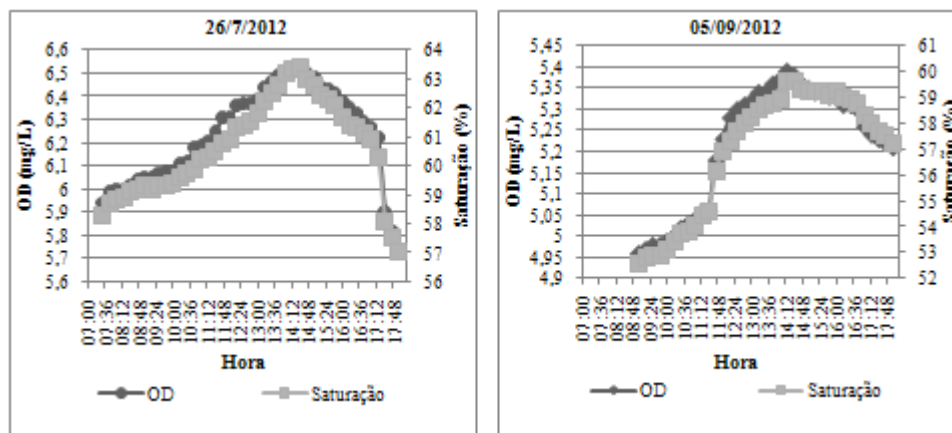


Figura 4 – Valores de OD durante o fotoperíodo – ponto 3

No dia 04/09/2012, no ponto 2, verificou-se uma pequena alteração nessa curva, não seguindo a tendência. Esse fato pode ser explicado, pois o ponto está localizado em uma área urbana e tem muita influência humana. Como, por exemplo, descargas de esgoto, o que faz aumentar a demanda bioquímica de oxigênio e, conseqüentemente, diminuir o oxigênio dissolvido pelo seu consumo.

Na tabela 4 estão apresentados os valores do coeficiente de reaeração calculados através de algumas fórmulas presentes na literatura e, novamente, são apresentados os valores de K_2 obtidos experimentalmente, para melhor visualização e comparação de resultados.

Tabela 4. Valores de K_2 obtidos através de fórmulas da literatura

Pontos	Data	O'Connor & Dobbins (1958)	Churchill et al. (1962)	Owens et al. (1964)	Langbein e Durum (1967)	Observado
1	24/04/2012	111,67	118,46	305,86	46,03	81,17
	04/06/2012	44,53	31,11	94,53	13,36	44,21
	22/08/2012	67,57	52,57	159,31	20,97	28,34
	25/10/2012	25,52	38,03	52,93	24,80	77,10
2	25/04/2012	54,32	76,34	140,33	38,39	13,09
	25/07/2012	95,84	107,64	255,77	44,48	36,05
	23/08/2012	43,79	36,53	94,77	16,78	39,15
	04/09/2012	25,83	17,23	48,40	8,42	21,32
3	26/07/2012	1,17	0,44	1,10	0,39	15,93
	05/09/2012	1,30	0,40	1,15	0,33	13,53

Observa-se que há uma variação muito grande entre os valores de K_2 obtidos através das equações com os valores observados. A variação confirma que essas formulações devem ser usadas com muita cautela, observando-se as características dos corpos hídricos, pois as equações são semi-empíricas válidas para as condições particulares dos escoamentos onde foram obtidas e se essas condições forem diferentes os resultados iram divergir significativamente.

A equação que melhor se ajustou aos resultados obtidos experimentalmente foi a proposta por O'Connor & Dobbins (1958), provavelmente, devido a sua faixa de aplicação de velocidade que permite que sejam usadas pequenas velocidades (0,05 a 0,8m/s). Os cálculos do dia 25/10/2012 para o ponto 1 mostram essa afirmação, ou seja, nesse dia encontrou-se uma velocidade maior que 0,8m/s que é fora da faixa de aplicação da fórmula de O'Connor & Dobbins. A equação que melhor

se ajustou a esse dia foi a de Owens et al. (1964) pois permite uma faixa de velocidade de 0,05 a 1,5m/s.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O rio Vacacaí Mirim, apresenta valores baixos de vazões, nos pontos experimentais, e baixos valores de oxigênio dissolvido. Demonstrando que o rio é poluído. Essa poluição deve-se ao fato que o rio está localizado em área urbana e recebe influência humana, como por exemplo, descargas de esgoto, além da poluição.

O cálculo do coeficiente de reaeração através das formulas presentes na literatura, divergiram significativamente. Com a incerteza gerada torna-se recomendável a avaliação experimental do coeficiente de reaeração.

O Método Delta Aproximado apresentou-se eficiente para determinação do coeficiente de reaeração. Os valores de OD quando plotados em gráficos demonstraram o que foi proposto pelo método: uma curva ascendente com pico (menor déficit de OD) perto do meio dia solar.

REFERÊNCIAS

- BRAGA, B. et al. (2005). *Introdução à engenharia ambiental*. São Paulo: Prentice Hall, 2^oed, 336p
- CHAPRA, S. C.; DI TORO, D. M. (1991). Delta Method for Estimating Primary Production, Respiration and Reaeration in Streams. *Journal of Environmental Engineering*. v.117, n.5.
- CHAPRA, S. C. (1997). *Surface water-quality modeling*. WCB – McGraw-Hill. Boston, 844p.
- FORMENTINI, T. A. GASTALDINI, M. C. C. (2010). Determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial: estado da arte. In *Anais do X Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Maceió, Fev. 2010.
- HAMPSON, P. S; COFFIN, J. E. (1989). Measurements of Reaeration Coefficients for Selected Florida Streams. *U. S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 87-4020*.
- MCBRIDE, G. B.; CHAPRA, S. C. (2005). Rapid Calculation of Oxygen in Streams: Approximate Delta Method. *Journal of Environmental Engineering (ASCE)*, pp. 336-342
- MELCHING, C. S.; FLORES, H. E. (1999). Reaeration equations derived from U.S. Geological Survey Database. *Journal of Environmental Engineering*, v.125, n.5, p.407-414.
- RATHBUN, R. E.; 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.
- SANTOS, I. et al. (2001). *Hidrometria aplicada*. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, LACTEC, 372 p.