

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

Cristiane Graepin

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DELTA
APROXIMADO PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE
REAERAÇÃO EM RIOS**

Santa Maria, RS
2016

Cristiane Graepin

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DELTA APROXIMADO PARA
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO EM RIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Área de concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Maria do Carmo Cauduro Gastaldini
Coorientadora: Prof^ª Dr^ª Débora Missio Bayer

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Graepin, Cristiane

VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DELTA APROXIMADO PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO EM RIOS / Cristiane Graepin.-2016.

132 p.; 30cm

Orientador: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini

Coorientador: Débora Missio Bayer

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, RS, 2016

1. Qualidade da Água 2. Oxigênio Dissolvido 3. Matéria Orgânica 4. Características Hidrodinâmicas I. Gastaldini, Maria do Carmo Cauduro II. Bayer, Débora Missio III. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Cristiane Graepin. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: crisgraepin@hotmail.com

Cristiane Graepin

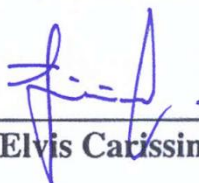
**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DELTA APROXIMADO PARA
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO EM RIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Área de concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Aprovado em 28 de março de 2016:



Maria do Carmo Cauduro Gastaldini, Dr^a
(Presidente/Orientadora)



Elvis Carissimi, Dr (UFSM)



Adilson Pinheiro, Dr. (FURB)



Santa Maria, RS
2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Alivar Graepin e Gilasia Graepin, que com palavras carinhosas e positivas nunca deixaram desistir dos meus sonhos. Pai e mãe, obrigada por todo carinho, motivação e compreensão nas horas em que estive ausente, vocês são meus maiores exemplos de vida. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter conseguido concluir mais esta etapa de minha vida.

Aos meus pais Alivar Graepin e Gilasia Graepin, por todo amor, motivação e compreensão. Ao meu irmão Alessandro Graepin, que sempre me alegrou nas horas de lazer e distração nesse período. Obrigada por tudo família, vocês são muito especiais, amo vocês!

Ao meu noivo Venicius de Ramos, que com todo amor e compreensão soube encarar comigo os desafios enfrentados. Obrigada por compreender minha ausência, e ser meu táxi em cada viagem a Santa Maria. Eu te amo!

A minha orientadora Prof^ª Dr^ª Maria do Carmo Cauduro Gastaldini que com todo seu carinho, paciência e palavras doces esteve sempre disposta a orientar e sanar qualquer dúvida referente a pesquisa. A co-orientadora Prof^ª Dr^ª Débora Missio Bayer, sempre muito atenciosa e disposta a melhorar o trabalho, ofereceu-me conhecimento e ferramentas necessárias na execução da pesquisa.

Aos professores Francisco Rossarolla Forgiarini e Débora Missio Bayer pelas contribuições no projeto de pesquisa.

Aos queridos colegas Adriano Ricardo Kappes, Glaucia Pivetta e Mateus Henrique Schmidt, não há palavras para expressar tamanha gratidão pelo apoio nas coletas de dados no campo, comendo lanche de almoço, enfrentando frio/calor o dia todo em cada campanha.

As minhas companheiras de apartamento Keila Hedlund e Samara Decezaro, que aguentaram muitas reclamações e queixas nesse período, obrigada por toda paciência e conselhos.

Aos amigos do GHIDROS que sempre estiveram presentes em qualquer ajuda solicitada: Adriano Ricardo Kappes, Alcides Sartori, Danrlei de Menezes, Deise Michelotti, Glaucia Pivetta, José Astério do Carmo, Laís Coelho Teixeira, Luiz Fernando Schallenberger, Marielle Medeiros, Mateus Henrique Schmidt, Osmar Schmidt Filho, Pablo Valcorte, Robson Ilha, Roberta Lisbôa, Sizabeli dos Santos, Taiane Conterato e Vinicius Kuchinski. Todos, sem exceção, me ajudaram de alguma forma, seja nas atividades de campo, formatação, ArcGIS, etc. Muito obrigada por tudo!

As colegas Angela Mendonça e Julia Caetano Manfio que me auxiliaram em atividades de campo.

A Rosa Maria Brito, secretária do PPGEAmb, sempre disposta, nunca mediu esforços para ajudar os mestrandos(as) em todas as atividades rotineiras.

A Companhia Riograndense de Saneamento pelo fornecimento dos dados. Em especial ao funcionário Felipe Mainardi.

A Universidade Federal de Santa Maria pelo ensino gratuito e de excelente qualidade.

A Capes pela bolsa de estudo concedida.

Conquistas sem riscos são sonhos sem méritos. Ninguém é digno dos seus sonhos se não usar suas derrotas para cultivá-los.

Augusto Cury

RESUMO

VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DELTA APROXIMADO PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO EM RIOS

AUTORA: Cristiane Graepin
ORIENTADORA: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini
COORIENTADORA: Débora Missio Bayer

O oxigênio dissolvido é um indicador importante que demonstra alterações da qualidade da água em rios, provocadas pelo lançamento/acúmulo de matéria orgânica. A determinação do coeficiente de reaeração torna-se indispensável, devido ao consumo de oxigênio dissolvido na oxidação da matéria orgânica. O coeficiente de reaeração pode ser determinado por modelos de natureza empírica ou métodos experimentais. Os métodos experimentais geralmente são caros e demorados. Porém, o Método Delta Aproximado proposto por McBride e Chapra (2005) é um método experimental de fácil aplicação e baixo custo. O método se baseia na estimativa de reaeração superficial, produção primária e respiração, basicamente por meio de medições diurnas do oxigênio dissolvido. O objetivo principal desse estudo foi analisar a viabilidade de aplicação do Método Delta Aproximado para determinar o coeficiente de reaeração em bacias hidrográficas. O estudo foi realizado em cinco bacias hidrográficas: Cancela-Tamandaí, Menino Deus II, Menino Deus IV, João Goulart e RSC 287. O coeficiente de reaeração é influenciado pelas características hidrodinâmicas dos rios. Assim, nas campanhas foram determinadas a velocidade, profundidade e vazão. Determinou-se a temperatura da água, as concentrações de oxigênio dissolvido, durante o fotoperíodo, e estimou-se a carga orgânica nos rios. Neste estudo a aplicação do Método Delta Aproximado foi viável apenas nas bacias João Goulart e RSC 287. A bacia Cancela-Tamandaí não apresentou um perfil de oxigênio dissolvido adequado, devido ao elevado lançamento de matéria orgânica no rio. A bacia Menino Deus II também apresentou inviabilidade, devido à ausência de um perfil de oxigênio dissolvido adequado. A bacia Menino Deus IV apresentou superestimação dos valores do coeficiente, e em grande parte das campanhas o mínimo déficit de oxigênio dissolvido ocorreu antes do meio-dia solar, impossibilitando a aplicação do método. Na bacia João Goulart foi viável a aplicação do método, porém com as seguintes limitações: viável em vazões de até 1,00 m³/s; deve haver presença regular de carga orgânica; o tempo entre o mínimo déficit de oxigênio dissolvido e o meio-dia solar não deve ser muito baixo. A bacia RSC 287 apresentou-se viável quanto à aplicação do método em suas características normais, no entanto nas campanhas com vazões maiores que 3,64 m³/s, e com presença de captação de água para irrigação o método não foi viável. Enfim, o Método Delta Aproximado apresentou inviabilidade nas seguintes condições: vazão maior que 1,00 m³/s para a bacia João Goulart e maior que 3,64 m³/s na bacia RSC 287; rios com teor de matéria orgânica muito alto ou muito baixo; baixo tempo entre o mínimo déficit de oxigênio dissolvido e o meio-dia solar; temperaturas baixas; e rios com captação de água. Na bacia João Goulart, onde o método pôde ser aplicado, foi feita correlação de Pearson com o coeficiente e as variáveis analisadas. Verificou-se correlação positiva significativa do coeficiente com a vazão, profundidade e velocidade. Contudo, o Método Delta Aproximado demonstrou experimentalmente ser de fácil aplicação e baixo custo. Porém, com uma diversidade de limitações em sua aplicação, tornando-o inviável em determinadas condições.

Palavras-chave: Qualidade da Água. Oxigênio Dissolvido. Matéria Orgânica. Características Hidrodinâmicas.

ABSTRACT

VIABILITY OF THE USE OF THE APPROXIMATE DELTA METHOD FOR DETERMINATION OF REAERATION COEFFICIENT IN RIVERS

AUTHOR: Cristiane Graepin
ADVISOR: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini
COADVISOR: Débora Missio Bayer

The dissolved oxygen is an important indicator that shows water quality variation in rivers, caused by the release/accumulation of organic matter. The determination of the reaeration coefficient is indispensable, due to the consumption of dissolved oxygen for the organic matter oxidation. The reaeration coefficient can be determined by empirical models or experimental methods. The experimental methods are generally expensive and slow. However, the Approximate Delta Method proposed by McBride and Chapra (2005) is an experimental method of easy application and low cost. This method is based on surface reaeration estimation, primary production, and respiration. Basically, it is estimated by means of daytime measurements of dissolved oxygen. The main goal was to analyze the application viability of the Approximate Delta Method to determine the reaeration coefficient in watershed. This study was carried out in five watersheds: Cancela-Tamandaí, Menino Deus II, Menino Deus IV, João Goulart and RSC 287. The reaeration coefficient is influenced by hydrodynamic characteristics of the rivers. Thus, the velocity, depth, and flow were monitored. It was determined the temperature of the water and the dissolved oxygen concentrations during the photoperiod, and it was estimated the organic load in the rivers. The application of the Approximate Delta Method was viable only in João Goulart and RSC 287 basins. The Cancela-Tamandaí basin does not presented an adequate dissolved oxygen profile. This was due to the high release of organic matter in the river. The Menino Deus II basin also presented unviability. This was due to the absence of an adequate dissolved oxygen profile. In the Menino Deus IV basin occurred overestimation of the coefficients, when was possible your estimation. In this basin, the minimum deficit in most of the dissolved oxygen profiles was before of the solar noon, avoided the application of the method. In João Goulart basin was viable the application of the method, but with some limitations: flows until $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$; there should be regular presence of organic load; and the time between the dissolved oxygen minimum deficit and the solar noon do not should be too low. The RSC 287 basin was viable in your normal hydrodynamic characteristics. The method was not viable with flow higher than $3.64 \text{ m}^3/\text{s}$, and in the agriculture irrigation season. Finally, the Approximate Delta Method presented unviability in some conditions: flow greater than $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$ for João Goulart basin, and then $3.64 \text{ m}^3/\text{s}$ in the RSC 287 basin; rivers with organic content very low or very high; low time between the dissolved oxygen minimum deficit and solar noon; low temperatures; and rivers with captation of the water. In the João Goulart basin, it was calculated the Pearson correlation coefficient between reaeration coefficient and the others variables. It was found significant correlation of the reaeration coefficient with the flow, depth, and velocity. However, the Approximate Delta Method showed experimentally to be easy to use and low cost. However, with a variety of limitations in its application, making it unviability to certain conditions.

Keywords: Water Quality. Dissolved Oxygen. Organic Matter. Hydrodynamic Characteristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Fenômenos interagentes do balanço de OD.....	30
Figura 2 -	Curva de depleção de oxigênio	32
Figura 3 -	Relação linear entre k_2 e P_w	38
Figura 4 -	Variáveis para estimativa do OD	42
Figura 5 -	Gráfico do k_2 (d^{-1}) versus Φ (horas) ao longo do fotoperíodo f (horas) para o Método Delta Aproximado	43
Figura 6 -	Fator Sensibilidade $dk_2/d\Phi$ ($d^{-1}/horas$) versus Φ (horas) para a estimativa do k_2 pelo Método Delta, sendo $f = 12$ horas	45
Figura 7 -	Curvas de OD diurno prevista utilizando as soluções analíticas do Método Delta com três conjuntos de parâmetros derivados por aplicação do Método Delta Aproximado ao Córrego Mangoronga.	46
Figura 8 -	Localização das bacias hidrográficas.....	49
Figura 9 -	Bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí.....	50
Figura 10 -	Seção fluviométrica da bacia Cancela-Tamandaí.....	51
Figura 11 -	Uso do solo na bacia Cancela-Tamandaí.....	51
Figura 12 -	Bacias hidrográficas Menino Deus II, Menino Deus IV, João Goulart e RSC 287.....	52
Figura 13 -	Seção fluviométrica da bacia Menino Deus II.....	53
Figura 14 -	Uso do solo na bacia Menino Deus II.....	54
Figura 15 -	Seção fluviométrica da bacia Menino Deus IV	55
Figura 16 -	Uso do solo na bacia Menino Deus IV	55
Figura 17 -	Área da bacia João Goulart sem contribuição do reservatório da CORSAN ...	56
Figura 18 -	Seção fluviométrica da bacia João Goulart.....	57
Figura 19 -	Uso do solo na bacia João Goulart.....	57
Figura 20 -	Área da bacia RSC 287 sem contribuição do reservatório da CORSAN	58
Figura 21 -	Seção fluviométrica da bacia RSC 287.....	59
Figura 22 -	Uso do solo na bacia RSC 287.....	59
Figura 23 -	Lavoura de arroz com irrigação	60
Figura 24 -	Captação de água para irrigação de lavouras de arroz.....	60
Figura 25 -	Captação de água na bacia, campanha realizada no dia 19/01/2016	61
Figura 26 -	Medição da velocidade com o uso do molinete hidrométrico	62
Figura 27 -	Medição de vazão, profundidade e velocidade média com a ADCP na seção fluviométrica da bacia RSC 287	63
Figura 28 -	Oxímetro, marca YSI Model 58.....	65
Figura 29 -	Veiculação de resíduos sólidos pela drenagem urbana na bacia Cancela-Tamandaí.....	73
Figura 30 -	Lançamento de matéria orgânica na Bacia Menino Deus II	74
Figura 31 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 04/11/2014	75
Figura 32 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 15/05/2015	76
Figura 33 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 12/02/2015.	77
Figura 34 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 12/03/2015	79
Figura 35 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 19/06/2015	80

Figura 36 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 04/02/2015.....	81
Figura 37 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 16/07/2015.....	82
Figura 38 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 16/06/2015.....	83
Figura 39 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 30/09/2015.....	85
Figura 40 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 06/11/2015.....	86
Figura 41 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 01/02/2016.....	86
Figura 42 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 19/01/2016.....	87
Figura 43 -	Valores do k_2 observado pelo Método Delta Aproximado e calculado pela equação de Formentini (2010).....	92
Figura 44 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 08/12/2014.....	105
Figura 45 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 03/02/2015.....	105
Figura 46 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 26/02/2015.....	106
Figura 47 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 18/03/2015.....	106
Figura 48 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 10/07/2015.....	107
Figura 49 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 23/10/2015.....	107
Figura 50 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 17/12/2014.....	108
Figura 51 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 12/01/2015.....	108
Figura 52 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 04/02/2015.....	109
Figura 53 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 20/03/2015.....	109
Figura 54 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 10/04/2015.....	110
Figura 55 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 24/04/2015.....	110
Figura 56 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 01/07/2015.....	111
Figura 57 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 15/07/2015.....	111
Figura 58 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 06/08/2015.....	112
Figura 59 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 02/09/2015.....	112
Figura 60 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 17/12/2014.....	113

Figura 61 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 12/01/2015	113
Figura 62 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 12/02/2015	114
Figura 63 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 12/03/2015	114
Figura 64 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 20/03/2015	115
Figura 65 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 10/04/2015	115
Figura 66 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 24/04/2015	116
Figura 67 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 26/05/2015	116
Figura 68 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 15/07/2015	117
Figura 69 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 06/08/2015	117
Figura 70 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 02/09/2015	118
Figura 71 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 18/12/2014	118
Figura 72 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 07/01/2015	119
Figura 73 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 13/01/2015	119
Figura 74 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 05/02/2015	120
Figura 75 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 03/03/2015	120
Figura 76 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 17/03/2015	121
Figura 77 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 31/03/2015	121
Figura 78 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 07/04/2015	122
Figura 79 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 14/04/2015	122
Figura 80 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 23/04/2015	123
Figura 81 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 05/05/2015	123
Figura 82 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 14/05/2015	124
Figura 83 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 12/08/2015	124
Figura 84 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 15/09/2015	125
Figura 85 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 07/12/2015	125

Figura 86 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 10/12/2015.....	126
Figura 87 -	Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 21/01/2016.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Valores do k_2 segundo equações de Owens et al.(1964), O'Connor e Dobbins (1958), Churchill et al. (1962), em suas respectivas faixas de aplicabilidade	40
Tabela 2 -	Características do Rio Grand em Agosto de 1960, sintetizada por O'Connor e Di Toro (1970)	44
Tabela 3 -	Áreas e percentuais do uso do solo da bacia Cancela-Tamandaí.....	52
Tabela 4 -	Classes do uso do solo na bacia Menino Deus II	53
Tabela 5 -	Classes do uso do solo na bacia Menino Deus IV	56
Tabela 6 -	Classes do uso do solo na bacia João Goulart	58
Tabela 7 -	Classes do uso do solo na bacia RSC 287	60
Tabela 8 -	Distância recomendada entre as verticais.....	62
Tabela 9 -	Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia Cancela-Tamandaí ...	68
Tabela 10 -	Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia Menino Deus II	69
Tabela 11 -	Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia Menino Deus IV	69
Tabela 12 -	Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia João Goulart.....	70
Tabela 13 -	Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia RSC 287	71
Tabela 14 -	Resultados das determinações de DBO.....	72
Tabela 15 -	Valores de Q, k_2 , $OD_{médio}$, $T_{média}$, C_s e DOD na bacia Cancela-Tamandaí	75
Tabela 16 -	Valores de Q, k_2 , $OD_{médio}$, $T_{média}$, C_s e DOD na bacia Menino Deus II	78
Tabela 17 -	Valores de Q, k_2 , $OD_{médio}$, $T_{média}$, C_s e DOD na bacia Menino Deus IV	80
Tabela 18 -	Valores de Q, k_2 , $OD_{médio}$, $T_{média}$, C_s e DOD na bacia João Goulart	83
Tabela 19 -	Contribuição do reservatório da CORSAN nas campanhas da bacia João Goulart	84
Tabela 20 -	Valores de Q, k_2 , $OD_{médio}$, $T_{média}$, C_s e DOD na bacia RSC 287	88
Tabela 21 -	Contribuição do reservatório da CORSAN nas campanhas da bacia RSC 287 ..	88
Tabela 22 -	Comparação do k_2 determinado por meio do Método Delta Aproximado e equação proposta por Formentini (2010).....	92
Tabela 23 -	Correlação do k_2 com os parâmetros analisados na bacia João Goulart	93
Tabela 24 -	Duração do fotoperíodo, nascer do sol e meio-dia solar na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí.....	127
Tabela 25 -	Duração do fotoperíodo, nascer do sol e meio-dia solar na bacia hidrográfica Menino Deus II.....	127
Tabela 26 -	Duração do fotoperíodo, nascer do sol e meio-dia solar na bacia hidrográfica Menino Deus IV	128
Tabela 27 -	Duração do fotoperíodo, nascer do sol e meio-dia solar na bacia hidrográfica João Goulart	128
Tabela 28 -	Duração do fotoperíodo, nascer do sol e meio-dia solar na bacia hidrográfica RSC 287	129
Tabela 29 -	Dados de H, v e P da bacia Cancela-Tamandaí.....	131
Tabela 30 -	Dados de H, v e P da bacia Menino Deus II	131
Tabela 31 -	Dados de H, v e P da bacia João Goulart	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
BFGS	Broyden, Fletcher, Goldfarb e Shanno
C	Concentração de oxigênio dissolvido
CO ₂	Dióxido de carbono
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
C _s	Concentração de saturação de oxigênio dissolvido na altitude
C _{máx}	Concentração máxima
C _{mín}	Concentração mínima
C _s '	Concentração de saturação de OD
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
D _{máx}	Déficit máximo
D _{mín}	Déficit mínimo
DOD	Déficit de oxigênio dissolvido
f	Fotoperíodo
Fr	Número de Froude
FURB	Fundação Universidade Regional de Blumenau
g	Aceleração da gravidade
GLP	Gás liquefeito de petróleo
H	Cota
H ⁺	Hidrogênio
H ₂ O	Água
K	Coefficiente de dessorção dos gases na água
K _T	Coefficiente de dessorção do gás traçador
k ₂	Coefficiente de reaeração
L	Comprimento total da seção
MD	Mínimo DOD antes do meio-dia solar
MO	Matéria Orgânica
NH ₃	Amônia
O ₂	Gás oxigênio
OD	Oxigênio dissolvido
OD _{médio}	Oxigênio dissolvido médio
P	Profundidade média
P _{av}	Taxa de produção primária de oxigênio
P _m	Taxa de produção instantânea máxima
P _w	Pressão sonora média ponderada
Q	Vazão
R	Razão entre os coeficientes
R	Taxa de respiração
R ²	Coefficiente de determinação de regressão
S	Declividade
SP	Sem perfil de OD adequado
T	Temperatura

$T_{\text{m\u00e9dia}}$	Temperatura m\u00e9dia di\u00e1ria
$t_{\text{m\u00e1x}}$	Tempo m\u00e1ximo
$t_{\text{m\u00edn}}$	Tempo m\u00ednimo
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
v	Velocidade m\u00e9dia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	OBJETIVOS	27
2.1	OBJETIVO GERAL	27
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1	QUALIDADE DA ÁGUA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS	29
3.2	BALANÇO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO	30
3.2.1	Consumo de oxigênio	31
3.2.2	Produção de oxigênio	33
3.3	COEFICIENTE DE REAERAÇÃO	34
3.4	METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DO k_2	35
3.4.1	Método dos Traçadores Gasosos	35
3.4.2	Método da Sonda Solúvel	36
3.4.3	Método da Pressão Sonora	37
3.4.4	Equações para determinar o k_2	38
3.4.5	Método Delta	40
3.5	MÉTODO DELTA APROXIMADO	41
3.6	ESTUDOS DE DETERMINAÇÃO DO k_2	46
4	MATERIAL E MÉTODOS	49
4.1	BACIAS HIDROGRÁFICAS ESTUDADAS	49
4.1.1	Bacia Hidrográfica Cancela-Tamandaí	50
4.1.2	Bacias Hidrográficas Menino Deus II, Menino Deus IV, João Goulart e RSC 287	52
4.1.2.1	<i>Bacia Hidrográfica Menino Deus II</i>	53
4.1.2.2	<i>Bacia Hidrográfica Menino Deus IV</i>	54
4.1.2.3	<i>Bacia hidrográfica João Goulart</i>	56
4.1.2.4	<i>Bacia hidrográfica RSC 287</i>	58
4.2	DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS ...	61
4.3	DETERMINAÇÃO DA CARGA ORGÂNICA	64
4.4	CAMPANHAS DE MONITORAMENTO	64
4.5	DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE OD E TEMPERATURA DA ÁGUA	64
4.6	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO - k_2	65
4.7	DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SATURAÇÃO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO E DÉFICIT DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO..	65
4.8	CORRELAÇÃO DE PEARSON	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1	CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS E CARGA ORGÂNICA ...	67
5.1.1	Características hidrodinâmicas	67
5.1.1.1	<i>Bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí</i>	68
5.1.1.2	<i>Bacia hidrográfica Menino Deus II</i>	68
5.1.1.3	<i>Bacia hidrográfica Menino Deus IV</i>	69
5.1.1.4	<i>Bacia hidrográfica João Goulart</i>	70
5.1.1.5	<i>Bacia hidrográfica RSC 287</i>	71
5.1.2	Demanda Bioquímica de Oxigênio	72
5.2	COEFICIENTE DE REAERAÇÃO (k_2)	74
5.2.1	Bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí	74
5.2.2	Bacia hidrográfica Menino Deus II	76

5.2.3	Bacia hidrográfica Menino Deus IV	79
5.2.4	Bacia hidrográfica João Goulart.....	82
5.2.5	Bacia hidrográfica RSC 287	85
5.2.6	Viabilidade da aplicação do Método Delta Aproximado na determinação do k_2	89
5.2.7	Influência das características hidrodinâmicas na determinação do k_2	90
5.3	CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	91
6	CONCLUSÕES.....	95
7	RECOMENDAÇÕES.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99
	APÊNDICE A - GRÁFICOS DO PERFIL DE OD NA BACIA HIDROGRÁFICA CANCELA-TAMANDAÍ.....	105
	APÊNDICE B - GRÁFICOS DO PERFIL DE OD NA BACIA HIDROGRÁFICA MENINO DEUS II.....	108
	APÊNDICE C - GRÁFICOS DO PERFIL DE OD NA BACIA HIDROGRÁFICA MENINO DEUS IV	113
	APÊNDICE D - GRÁFICOS DO PERFIL DE OD NA BACIA HIDROGRÁFICA JOÃO GOULART	118
	APÊNDICE E - GRÁFICOS DO PERFIL DE OD NA BACIA HIDROGRÁFICA RSC 287	125
	APÊNDICE F - DURAÇÃO DO FOTOPERÍODO, NASCER DO SOL E MEIO-DIA SOLAR NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	127
	ANEXO A - DADOS DE COTA, VELOCIDADE MÉDIA E PROFUNDIDADE MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA CANCELATA-MAMANDAÍ....	131
	ANEXO B - DADOS DE COTA, VELOCIDADE MÉDIA E PROFUNDIDADE MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA MENINO DEUS II.....	131
	ANEXO C - DADOS DE COTA, VELOCIDADE MÉDIA E PROFUNDIDADE MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA JOÃO GOULART	132

1 INTRODUÇÃO

A quantidade de água doce disponível no planeta poderia satisfazer grande parte das necessidades da população, se fosse uniformemente distribuída e com qualidade adequada. Os recursos hídricos têm enfrentado uma grande ameaça. A expansão urbana, agricultura, pecuária, atividades industriais, entre outros têm ocasionado sérios problemas quanto à qualidade da água dos rios. A baixa disponibilidade de rede coletora e tratamento de esgoto, associada à falta de conscientização da população, conduzem ao descarte de efluentes, sem tratamento prévio, em córregos e rios, ocasionando um aumento da matéria orgânica nos corpos hídricos.

O processo natural de autodepuração ocorre pela ação de micro-organismos que consomem o oxigênio dissolvido (OD) da água para a degradação da matéria orgânica. Os efeitos da autodepuração resultam em uma elevada variação diurna da concentração do OD. Assim, a caracterização adequada da produção de oxigênio é essencial no balanço de OD.

O balanço de OD é essencial em modelos matemáticos de qualidade de água. Nestes modelos, a produção de OD, pela reaeração atmosférica, é estimada por meio do coeficiente de reaeração (k_2), por ser uma quantificação da capacidade de introdução de oxigênio na água; este oxigênio que faz parte do processo de estabilização da matéria orgânica por processo aeróbio.

O k_2 pode ser determinado por modelos de natureza empírica ou métodos experimentais. As equações empíricas são imprecisas e os métodos experimentais na maioria das vezes são caros, demorados e necessitam de uma equipe numerosa de trabalho.

Assim, McBride e Chapra (2005) desenvolveram o Método Delta Aproximado, que apesar de ser considerado um método experimental, não apresenta as desvantagens anteriormente descritas. O método baseia-se na estimativa de reaeração superficial, produção primária e respiração, basicamente por meio de medições diurnas do OD. O uso deste método para determinar o k_2 é de fácil aplicação, necessitando apenas do perfil de OD durante o fotoperíodo e de dados meteorológicos. Porém, o método possui elevada sensibilidade na sua aplicação, que deve ser levada em consideração para obter resultados satisfatórios.

As características hidrodinâmicas dos rios influenciam nos valores do k_2 , devido à particularidade de suas características (BENETT e RATHBUN, 1972). Os dados de entrada em equações empíricas de determinação do k_2 , geralmente são as características hidrodinâmicas, devido a alta correlação dessas variáveis com o coeficiente.

Apesar da fácil aplicabilidade do Método Delta Aproximado, esta não é vastamente discutida na literatura. Diferentes condições e características dos rios podem ser favoráveis ou desfavoráveis na aplicação do método. Esta carência de informação torna de suma importância a análise da viabilidade de aplicação do método em seções fluviométricas de diferentes bacias hidrográficas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal foi analisar a viabilidade de aplicação do Método Delta Aproximado para determinar o coeficiente de reaeração (k_2) em seções fluviométricas de bacias hidrográficas da região central do Rio Grande do Sul.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

- Estabelecer o perfil de OD diurno nas seções fluviométricas de diferentes bacias hidrográficas;
- Verificar as limitações de aplicabilidade do Método Delta Aproximado em função das características hidrodinâmicas, meteorológicas e carga orgânica;
- Determinar o k_2 para as seções fluviométricas de diferentes bacias hidrográficas, utilizando o Método Delta Aproximado;
- Correlacionar o k_2 com as características hidrodinâmicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 QUALIDADE DA ÁGUA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Apesar de a água ser uma necessidade para praticamente todas as atividades humanas, atualmente encontra-se problemas relacionados à quantidade e qualidade desse importante recurso natural (SILVA et al., 2014). Consequência do lançamento de esgotos e resíduos sólidos nos rios em áreas urbanas. Tais problemas geralmente ocorrem devido a dificuldades socioeconômicas, que conduzem uma expansão irregular nas periferias, a qual não obedece à regulamentação urbana do Plano Diretor e normas específicas de ocupação do solo, e acabam por construir suas residências nas áreas ribeirinhas dos rios (SILVEIRA et al., 2003).

A poluição de um recurso hídrico pode ser caracterizada como a alteração de suas características físicas, químicas e biológicas de forma a tornar prejudicial aos seres que nele se abrigam ou impedir/ameaçar seu uso. Podem ser considerados como principais fontes de poluição da água os esgotos domésticos, resíduos sólidos domésticos, águas pluviais, dejetos de animais, agrotóxicos e fertilizantes (CALIJURI e CUNHA, 2013). As fontes de poluição podem ser difusas ou pontuais.

A poluição por cargas difusas pode ser de natureza urbana, rural, industrial ou atmosférica. Nas áreas urbanas a mesma tem composição complexa, com metais, óleos, resíduos sólidos, materiais de construção, constituindo-se uma fonte de poluição associada à drenagem urbana, coleta de esgotos e de resíduos domésticos (MANSOR et al., 2006). De modo geral, são cargas poluidoras que surgem nos rios sem identificação de seu ponto de entrada.

As cargas de poluição pontuais são geralmente mais fáceis de gerenciar e identificar e sua caracterização é mais direta e objetiva. Considera-se como poluição pontual uma fonte única identificável, sendo os poluentes descarregados por meio de tubulações, valas ou drenos. As cargas brutas ou remanescentes de esgotos domésticos e industriais são os tipos mais comuns de fontes pontuais (CALIJURI e CUNHA, 2013).

As condições ambientais impostas a uma bacia hidrográfica refletem na qualidade da água dos rios. Assim, o conhecimento das suas características estende o conhecimento do ecossistema e possibilita identificar as alterações provocadas por atividades antrópicas (SOUZA e GASTALDINI, 2014).

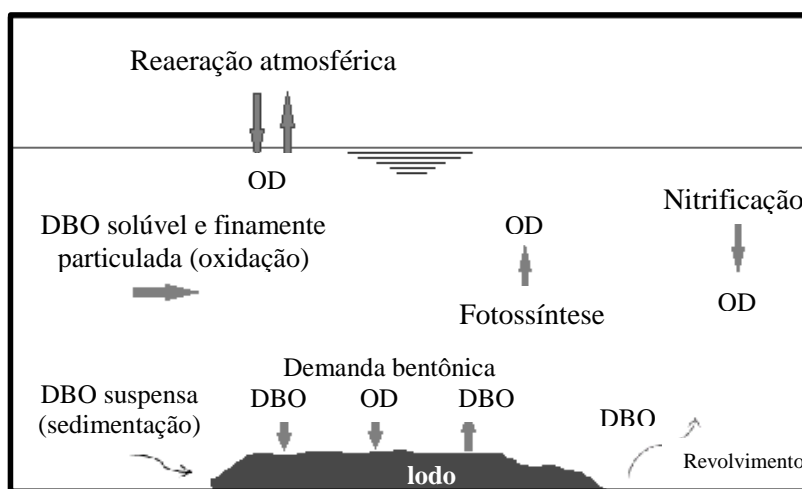
3.2 BALANÇO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO

O teor e o déficit de OD são parâmetros importantes, geralmente utilizados para avaliar a qualidade da água em rios. O teor de OD pode ser utilizado como um índice de qualidade da água, uma vez que a concentração de OD na água é uma característica importante quando se busca a proteção ambiental perante a poluição hídrica (RUDOLPH et al., 2002). Este teor é um indicador das condições de poluição por matéria orgânica (MO). Uma água não poluída por MO deve estar saturada de oxigênio, assim teores baixos podem indicar a ocorrência de uma intensa atividade bacteriana decompondo a MO presente na água (MOTA, 1995).

Para análise do comportamento de OD e da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em um rio, após o lançamento de uma carga orgânica, os pesquisadores Streeter e Phelps (1925) foram pioneiros no desenvolvimento de um modelo de qualidade da água. O modelo estima a concentração do OD em função da decomposição da MO e da reaeração do rio, levando em consideração o balanço de OD, com coeficientes de oxigenação e desoxigenação.

O balanço de OD de um rio, apresentado na figura 1, é influenciado por processos de desoxigenação e oxigenação, ou seja, pelo consumo e produção de oxigênio no meio. O fenômeno de desoxigenação leva em consideração a decomposição da MO pelos microorganismos, e os processos de oxigenação são oriundos da reaeração atmosférica e seres fotossintetizantes (VON SPERLING, 2014).

Figura 1 - Fenômenos interagentes do balanço de OD



Fonte: Adaptada de Von Sperling (2014)

Para compreender o balanço de OD é necessário o conhecimento dos processos de consumo e de produção de oxigênio, apresentados nos itens 3.2.1 e 3.2.2.

3.2.1 Consumo de oxigênio

O consumo excessivo de OD nos rios provoca desequilíbrios ecológicos no meio, podendo resultar na morte de peixes e outros organismos aeróbicos, devido à desoxigenação. A desoxigenação pode ser provocada por agentes redutores químicos ou pela decomposição biológica da MO presente na água. Os redutores químicos causam a demanda química de oxigênio (DQO) e a decomposição biológica da MO produz DBO (MOTA, 1995).

Os principais interagentes do consumo de oxigênio que provocam a desoxigenação são: oxidação da MO, demanda bentônica e nitrificação. A oxidação da MO representa o principal fator de consumo de oxigênio no rio. Tal consumo é provocado pela respiração dos micro-organismos decompositores, principalmente as bactérias heterotróficas aeróbicas. Assim, os teores de OD são inferiores aos de saturação, havendo um déficit de oxigênio (VON SPERLING, 2014).

A MO sedimentada forma um lodo de fundo, que também pode consumir OD, sendo chamada de demanda bentônica. Grande parte da conversão dessa MO se dá em condições anaeróbicas, devido à dificuldade de penetração do oxigênio na camada de lodo. No entanto, havendo presença de oxigênio na interface líquida, há a penetração de oxigênio em uma fina camada de lodo, da ordem de alguns milímetros, sendo estabelecida uma decomposição aeróbia (ANDRADE, 2010; LIMA, 1997).

O processo de nitrificação se relaciona com a oxidação de formas nitrogenadas, havendo a transformação de amônia em nitritos, e posteriormente a nitratos. Os micro-organismos autótrofos quimiossintetizantes são os responsáveis por esse processo, tendo o dióxido de carbono como sua principal fonte de carbono, e a oxidação da amônia (substrato inorgânico) como fonte de energia (VON SPERLING, 2014).

A variação do teor de OD em um rio ao receber uma carga orgânica, e passar pelos fatores descritos anteriormente, é chamada de curva de depleção de oxigênio. Esta curva é apresentada na figura 2, na qual se observa que o lançamento do despejo orgânico promove uma redução no teor de OD na água, chamado déficit de OD (equação 1). Esta carga orgânica se desloca ao longo do rio. Assim, percebe-se que ao longo deste deslocamento, por determinado tempo, a concentração de OD diminui, conseqüentemente o déficit de OD aumenta. Posteriormente, por meio dos processos naturais de reoxigenação, o teor de OD

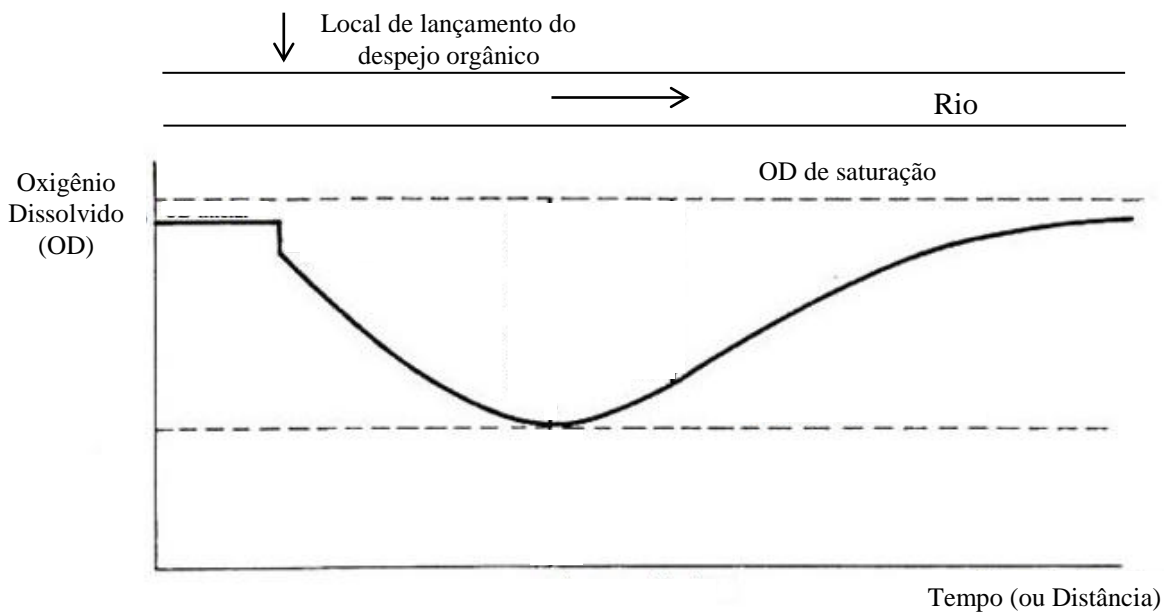
tende a aumentar, retornando ao valor que estava antes de receber a carga orgânica (MOTA, 1995; VON SPERLING, 2014; CHAPRA, 1997).

$$DOD = C_s' - C \quad (1)$$

sendo:

- DOD : déficit de OD (mg/L);
- C_s' : concentração de saturação de OD (mg/L);
- C : concentração de OD (mg/L).

Figura 2 - Curva de depleção de oxigênio



Fonte: Adaptada de Chapra (1997)

Portanto, como componentes da desoxigenação têm-se a demanda bentônica, nitrificação e oxidação da MO. A oxidação é o principal consumo de OD, que se deve a respiração dos micro-organismos decompositores. A representação do processo de desoxigenação em rios após o lançamento de despejos orgânicos, se dá pela curva de depleção de oxigênio, que apresenta o comportamento do OD durante a decomposição da MO.

3.2.2 Produção de oxigênio

O déficit de oxigênio dissolvido (DOD) no curso d'água ocasiona uma busca para uma nova situação de equilíbrio, como observado anteriormente na curva de depleção de oxigênio, com a necessidade de inserção de oxigênio no meio. Tal inserção pode ser oriunda da reaeração atmosférica e/ou fotossíntese das plantas aquáticas.

O principal fator responsável pela introdução de oxigênio no meio líquido é a reaeração atmosférica. A mesma ocorre pela transferência de oxigênio da fase gasosa para a líquida, que se dá por meio da difusão molecular e difusão turbulenta. A difusão molecular é predominante em águas paradas ou bastante lentas, podendo ser descrita como a tendência de qualquer substância se espalhar uniformemente por todo o espaço disponível. A difusão turbulenta é mais eficiente, envolvendo a criação de interfaces e renovação destas, sendo os principais fatores de uma excelente reaeração. É importante salientar que a condição de difusão predominante apresenta-se em função das características hidrodinâmicas do rio (VON SPERLING, 2014).

A fotossíntese é o principal processo utilizado pelos seres autotróficos clorofilados para a síntese da MO, sendo realizado somente em presença de energia luminosa. Os seres autotróficos realizam muito mais síntese do que oxidação, gerando uma reserva de energia para os seres heterotróficos, além de um superávit de oxigênio que permite a respiração de outros micro-organismos. Vale ressaltar, que o fenômeno da fotossíntese pode ser prejudicado com a turbidez elevada no rio. O impedimento da entrada de luz provoca uma diminuição da presença de algas (VON SPERLING, 2014; PAULA, 2011).

A determinação quantitativa da produção fotossintética de oxigênio em corpos d'água naturais pode ser vista por três diferentes abordagens (O'CONNOR e DI TORO, 1970): (i) uso de técnicas envolvendo a medição direta da produção de oxigênio; (ii) cálculo da produção de oxigênio usando determinações laboratoriais da taxa fotossintética líquida de oxigênio, por unidade de peso seco da planta aquática ou por unidade de concentração de clorofila, e da relação desta taxa com a intensidade da luz; (iii) uso de técnicas baseadas no princípio de balanço de massa do oxigênio.

A fotossíntese e a respiração das plantas podem adicionar e retirar, respectivamente, quantidades significativas de oxigênio em águas naturais. No crescimento da planta a oscilação do oxigênio pode ser induzida por variações de luz diurnas, assim o nível de oxigênio no rio pode ser supersaturado durante a tarde e severamente reduzido antes do amanhecer (CHAPRA, 1997). No entanto, isso ocorre com maior frequência em rios com

níveis moderados de poluição, DBO e demanda bentônica (CORREA-GONZÁLEZ et al., 2014).

Contudo, a produção de OD nos rios ocorre principalmente por meio da reaeração atmosférica e da fotossíntese. Na reaeração atmosférica ocorre a transferência de oxigênio da fase gasosa para a líquida. O processo da fotossíntese é realizado por seres autotróficos clorofilados que realizam a síntese da MO.

3.3 COEFICIENTE DE REAERAÇÃO

A reaeração é oriunda dos fatores de produção de oxigênio. A reaeração superficial refere-se à transferência de massa de oxigênio do ar para a água, que é proporcional a diferença entre a concentração de saturação e a concentração atual de OD na água. Em rios com elevadas cargas orgânicas, o oxigênio é fornecido exclusivamente por reaeração, tornando esse processo fundamental para a recuperação do rio (CORREA-GONZÁLEZ, 2014). A cinética de reaeração pode ser caracterizada por uma reação de primeira ordem (equação 2). Observa-se que a taxa de absorção de oxigênio é diretamente proporcional ao DOD. Quanto maior o déficit, maior a busca da massa líquida pelo oxigênio (VON SPERLING, 2014).

$$\frac{dDOD}{dt} = -k_2 \cdot DOD \quad (2)$$

sendo:

- k_2 : coeficiente de reaeração (d^{-1});

- t : tempo (d).

O k_2 é utilizado principalmente na quantificação do processo de reaeração para o uso em modelos de qualidade da água baseados no OD (ÁVILA, 2014). A determinação do k_2 pode ser feita por meio de modelos de natureza empírica e métodos experimentais desenvolvidos para tal finalidade. Os modelos empíricos e semiempíricos consistem em equações que atendem de forma mais precisa ao local em que foram originados. Assim, para haver melhor precisão em um estudo torna-se necessária a determinação do k_2 para cada curso hídrico por meio de métodos experimentais, devido às singularidades das características hidrodinâmicas (PINHEIRO et al., 2012).

As características hidrodinâmicas de um rio, portanto, são indispensáveis no estudo do k_2 , devido a cada corpo d'água apresentar suas próprias propriedades hidrodinâmicas. Em termos hidrodinâmicos os rios podem ser caracterizados por correntes unidirecionais, com velocidades médias de fluxo variando de 0,1 – 1 m/s, na superfície livre. Os fluxos são variáveis no tempo, sendo influenciados pela situação climática e padrão de drenagem. A mistura geralmente ocorre de forma vertical completa e contínua, devido a correntes e à turbulência (GASTALDINI e MENDONÇA, 2001).

A velocidade e profundidade média dos cursos d' água são fatores que influenciam o valor do k_2 . Alguns pesquisadores (O'CONNOR e DOBBINS, 1958; CHURCHILL et al., 1962; OWENS et al., 1964) tentaram correlacionar o valor do k_2 com variáveis hidráulicas do rio, por meio de equações empíricas. Os rios mais rasos e velozes tendem a possuir um valor maior para o k_2 , devido a maior facilidade de mistura ao longo da profundidade e à criação de maiores turbulências na superfície. A vazão também possui elevada correlação com o valor do k_2 , devido à relação entre vazão, velocidade e profundidade (VON SPERLING, 2014).

Dessa forma, para uma boa precisão na determinação da reaeração de um rio, determinada a partir do valor do k_2 , a melhor alternativa são os métodos experimentais. A determinação das características hidrodinâmicas é indispensável, devido à influência dessas na variação do coeficiente.

3.4 METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DO k_2

Os métodos experimentais para a determinação do valor do k_2 geralmente são demorados e caros, com exceção do Método Delta Aproximado, que é de fácil aplicação, barato e rápido. Já as equações empíricas são mais fáceis de manusear, necessitando apenas de características hidrodinâmicas do rio para a determinação do k_2 , porém são imprecisas em seus resultados, quando não são utilizadas no local em que foram originadas. A seguir, apresentam-se alguns métodos experimentais e equações empíricas presentes na literatura para a determinação do valor do k_2 .

3.4.1 Método dos Traçadores Gasosos

Dentre os métodos de avaliação experimental do k_2 , o método dos traçadores gasosos é o mais confiável, porém possui um custo elevado. O princípio da técnica dos traçadores é a observação da relação entre a taxa de dessorção do gás traçador injetado na água e a taxa de

absorção de oxigênio atmosférico na mesma, processo este que independe das condições de temperatura e de mistura, sendo o k_2 calculado pela equação 3 (RATHBUN e GRANT, 1978),

$$k_2 = K_t/R \quad (3)$$

sendo:

- k_2 : coeficiente de reaeração (d^{-1});
- K_T : coeficiente de desorção do gás traçador (d^{-1});
- R : razão entre os coeficientes.

O procedimento para a obtenção do k_2 por este método consiste na injeção simultânea de um traçador gasoso e um conservativo de referência. O traçador gasoso tem por objetivo simular a troca gasosa na interface líquido-gás, sendo a perda para a atmosfera proporcional à absorção de oxigênio pelo rio. O traçador conservativo permite o ajuste da concentração do gás em qualquer ponto de coleta, corrigindo os efeitos de dispersão e diluição que ocorrem, pelo aumento da distância em relação aos pontos de injeção e ao incremento de vazão ao longo de um trecho do rio (FORMENTINI, 2010).

No método dos traçadores gasosos, frequentemente se utiliza como traçador gasoso o gás propano, enquanto que a rodamina-WT é utilizada como traçador de referência (FORMENTINI, 2010; LAENEN e WOO, 1994). O propano é um gás incolor, inflamável e não tóxico, porém com poder asfixiante simples (NR 15, 2014). A rodamina-WT possui uma cor avermelhada, o que facilita a visualização da chegada da onda no rio, boa solubilidade em água, forte detectabilidade, não tóxica para os seres humanos e animais em baixas concentrações, e presença natural nula (BARBOSA JR et al., 2005; SOARES et al., 2013). Outros traçadores gasosos também podem ser utilizados, como o gás liquefeito de petróleo (GLP) que é leve, de fácil transporte e torna a aplicação do método econômica (PINHEIRO et al., 2012).

3.4.2 Método da Sonda Solúvel

Costa (2000) afirma que o método da sonda solúvel para determinar o k_2 foi concebido por Giorgetti e Giansanti (1983), aperfeiçoada por Schulz (1985), Giansanti (1986) e Schulz (1989), sendo uma técnica muito promissora. O método da sonda solúvel, comparado com outras técnicas, consiste em uma metodologia simples e econômica, o qual determina o k_2 de

forma indireta, por meio do processo de dissolução de uma sonda sólida solúvel flutuando em água.

A determinação do k_2 a partir da dissolução de um sólido solúvel flutuando junto à superfície livre do escoamento baseia-se no princípio de que os processos de reaeração e dissolução do sólido são funções da movimentação turbulenta sofrida pela água em escoamento. O procedimento é simples, uma partícula de material sólido (solúvel em água) é acoplada em uma bóia exposta a flutuar, que desce livremente com a corrente de um rio. A velocidade de dissolução do sólido é tanto maior quanto mais intensa for a turbulência do escoamento na superfície livre, responsável pela reaeração (GIORGETTI E SCHULZ, 1990).

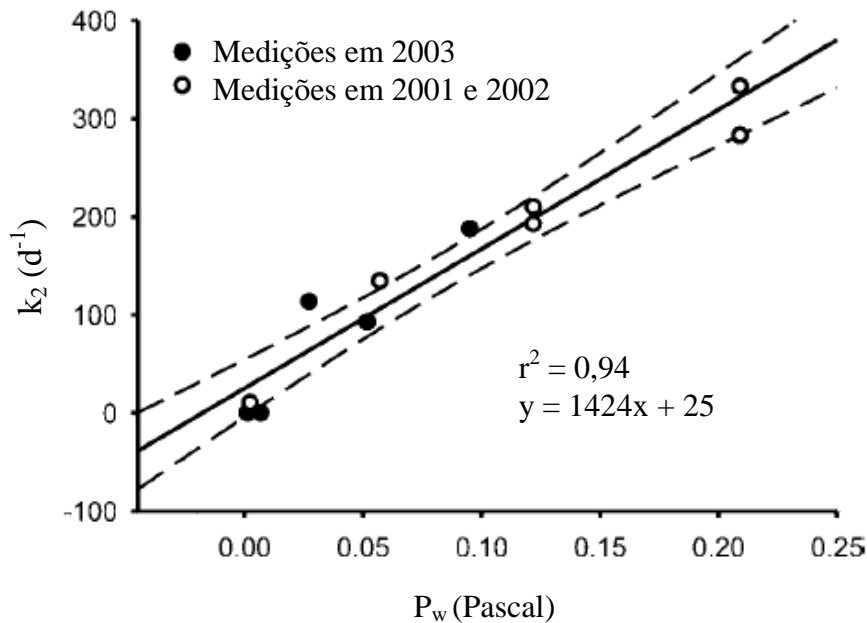
3.4.3 Método da Pressão Sonora

O método da pressão sonora consiste em um comparativo, pouco oneroso e com rápida resposta para estimar o k_2 , baseado na hipótese de que há uma relação confiável entre a pressão sonora média em um trecho de água em escoamento com o k_2 , sendo ambos dependentes da turbulência (MORSE et al., 2007).

Segundo Morse et al. (2007) para cada avaliação mede-se o comprimento, o nível sonoro e de ruído em cada trecho de característica geomórfica diferente. Assim determina-se a pressão sonora em cada trecho e pondera-se de acordo com o comprimento total do trecho que a característica representa, conforme a equação 4. Dessa forma, se estabelece uma relação linear entre o k_2 e P_w (pressão sonora média ponderada). A figura 3 apresenta a relação linear entre o k_2 e P_w , em observações estabelecidas por Morse et al. (2007) em um rio nos anos de 2001, 2002 e 2003,

$$P_w = \sum_{i=1}^N (F_i \cdot P_{Ai}) \quad (4)$$

sendo: P_{Ai} , o nível de som ponderado pela fração do comprimento da corrente representada pelas características geomórficas (F_i).

Figura 3 - Relação linear entre k_2 e P_w 

Fonte: Adaptada de Morse et al. (2007)

O método apresenta-se como uma proposta nova, havendo várias questões a serem resolvidas e testadas. Os primeiros resultados foram satisfatórios, provando a relação existente entre o k_2 e os níveis de pressão sonora, porém até que seja estabelecida uma relação teórica confiável, experimentos com outras técnicas devem ser utilizados para fins de calibração (Morse et al., 2007).

3.4.4 Equações para determinar o k_2

A determinação do k_2 pelos métodos experimentais exige um esforço considerável nas atividades de campo e laboratório, necessita de tempo e de recursos disponíveis. Quando esses são escassos, podem se tornar um inconveniente na determinação do coeficiente. Dessa forma, surgem as equações empíricas para estimar o k_2 , as quais necessitam apenas das características hidrodinâmicas do rio. O quadro 1 apresenta um levantamento bibliográfico de algumas equações disponíveis para determinar o k_2 . Tais equações possuem restrições de uso, devendo-se haver cautela na escolha da melhor equação, de acordo com as características do rio.

Em rios rasos, geralmente o k_2 apresenta-se com valores elevados, a tabela 1 apresenta valores de k_2 obtidos em rios rasos por meio das equações empíricas propostas por O'Connor e Dobbins (1958), Churchill et al. (1962) e Owens et al. (1964).

Quadro 1 - Equações empíricas para determinação do k_2

Autor (es)	Equação (d^{-1})	Restrição para Aplicação
O'Connor e Dobbins (1958) ⁽¹⁾	$k_2 = 3,73 \cdot v^{0,5} \cdot P^{-1,5}$	$0,6 < P < 4,0$ $0,05 < v < 0,8$
Churchill et al. (1962) ⁽¹⁾	$k_2 = 5,0 \cdot v^{0,97} \cdot P^{-1,67}$	$0,6 < P < 4$ $0,8 < v < 1,5$
Owens et al. (1964) ⁽¹⁾	$k_2 = 5,3 \cdot v^{0,67} \cdot P^{-1,85}$	$0,1 < P < 0,6$ $0,05 < v < 1,5$
Thackston e Krenkel (1966) ⁽²⁾	$k_2 = 24,9 (1 + Fr^{0,5}) \cdot \frac{v}{P}$	$0,01 < P < 7,3$ $0,06 < v < 1,5$
Tsivoglou e Wallace (1972)	$k_2 = 31,6 \cdot v \cdot (1000 \cdot S)$ $k_2 = 15,4 \cdot v \cdot (1000 \cdot S)$	$0,03 < Q < 0,3$ $0,3 < Q < 8,5$
Parker e Gay (1987)	$k_2 = 312,85 \cdot P^{-0,176} \cdot v^{0,355} \cdot S^{0,438}$	$0,1 < P < 2,0$ $0,05 < v < 0,7$
Smoot (1988) ⁽²⁾	$k_2 = 543 \cdot P^{-0,7258} \cdot v^{0,5325} \cdot S^{0,6236}$	-
Moog e Jirka (1998) ⁽²⁾	$k_2 = 1740 \cdot P^{0,74} \cdot v^{0,46} \cdot S^{0,79}$	$S > 0,00$
Melching e Flores (1999)	$k_2 = 517 \cdot (v \cdot S)^{0,524} \cdot Q^{-2,422}$	$Q < 0,556$
Jha et al. (2001) ⁽²⁾	$k_2 = 5,79 \cdot v^{0,5} \cdot P^{-0,25}$	-
Thackston e Dawson (2001) ⁽²⁾	$k_2 = 0,000025 \cdot (1 + 9Fr^{0,25}) \cdot (9,81SD)^{0,5} \cdot P^{-1}$	-
Formentini (2010)	$k_2 = 836 \cdot (v \cdot S)^{0,524} \cdot Q^{-0,015}$	$0,1 < Q < 1,5$ $0,08 < v < 0,3$

Legenda: P = profundidade média (m); v = velocidade média (m/s); Q = vazão (m^3/s); Fr = número de Froude ($u/\sqrt{g \cdot H}$); g = aceleração da gravidade; S = declividade do trecho.

Fonte: (1) Von Sperling (2005); (2) Jain e Jha (2005)

As equações empíricas que preveem o k_2 , no entanto, não possuem boa precisão. Melching e Flores (1999) elencaram alguns problemas nas equações encontradas na literatura. Os mesmos relatam que: (i) grande parte das equações são derivadas de pequenos conjuntos de dados de laboratório ou de campo; (ii) a maioria das equações de determinação do k_2 são desenvolvidas a partir de dados de campo, e derivadas de avaliações de k_2 obtidos por métodos de balanço de OD ou perturbação de equilíbrio, com possíveis erros de medição dos elementos presentes nos métodos; (iii) e os valores de k_2 obtidos em laboratórios são precisos,

porém é difícil saber o quão bem são representadas em laboratório as condições de reaeração do campo.

Tabela 1 - Valores do k_2 segundo equações de Owens et al.(1964), O'Connor e Dobbins (1958), Churchill et al. (1962), em suas respectivas faixas de aplicabilidade

V(m/s)	k_2 (d ⁻¹) (base e, 20° C)									
	H (m)									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0,2	35,4	9,8	3,6	2,3	1,7	1,3	1,0	0,8	0,7	0,6
0,3	46,5	12,9	4,4	2,9	2,0	1,6	1,2	1,0	0,8	0,7
0,4	56,3	15,6	5,1	3,3	2,4	1,8	1,4	1,2	1,0	0,8
0,5	65,4	18,1	5,7	3,7	2,6	2,0	1,6	1,3	1,1	0,9
0,6	73,9	20,5	6,2	4,0	2,9	2,2	1,7	1,4	1,2	1,0
0,7	82,0	22,7	6,7	4,4	3,1	2,4	1,9	1,5	1,3	1,1
0,8	89,6	24,9	9,5	5,8	4,0	3,0	2,3	1,8	1,5	1,3
0,9	97,0	26,9	10,6	6,6	4,5	3,3	2,6	2,1	1,7	1,4
1,0	104,1	28,9	11,7	7,3	5,0	3,7	2,9	2,3	1,9	1,6

Legenda: Owens et al. O'Connor e Dobbins Churchill et al.

Fonte: Von Sperling (2014)

3.4.5 Método Delta

Há 60 anos atrás, Odum (1956) indicou que a produção fotossintética poderia ser estimada utilizando um modelo de balanço de massa juntamente com medições de OD. Em 1970, O'Connor e Di Toro formalizaram matematicamente a abordagem de Odum (1956), em seu método envolvia uma técnica de solução analítica baseada em uma representação de séries Fourier da produção primária. Devido a esses métodos exigirem um significativo empenho computacional, como alternativa Di Toro (1981) desenvolveu um procedimento orientado graficamente simples para estimar a taxa de fotossíntese com base na variação diária de OD (CHAPRA e DI TORO, 1991).

Chapra e Di Toro (1991) aplicaram o método proposto por Di Toro (1981) no Rio Grand e derivaram a solução analítica para o déficit diurno de oxigênio, de maneira mais fácil

de implementar do que as séries de Fourier. Além disso, elaboraram uma análise de sensibilidade para a aplicação do Método Delta.

Na sequência, McBride e Chapra (2005) propuseram o Método Delta Aproximado, baseado no Método Delta proposto por Chapra e Di Toro (1991). Os pesquisadores buscaram esclarecer que o conjunto dos parâmetros para os três processos fundamentais (k_2 , produção primária e respiração) é mais importante do que seus valores individuais no cálculo do perfil de OD.

O Método Delta Aproximado é considerado simples e de fácil aplicação, devido a necessitar de apenas uma seção para a realização das medições diurnas de OD e dados meteorológicos. Entretanto, há algumas incertezas na estimativa da reaeração, que podem ser compensadas por outros ajustes no próprio método, levando em consideração a determinação da produção primária de oxigênio e a respiração, de modo a manter fixos os valores do déficit de oxigênio.

3.5 MÉTODO DELTA APROXIMADO

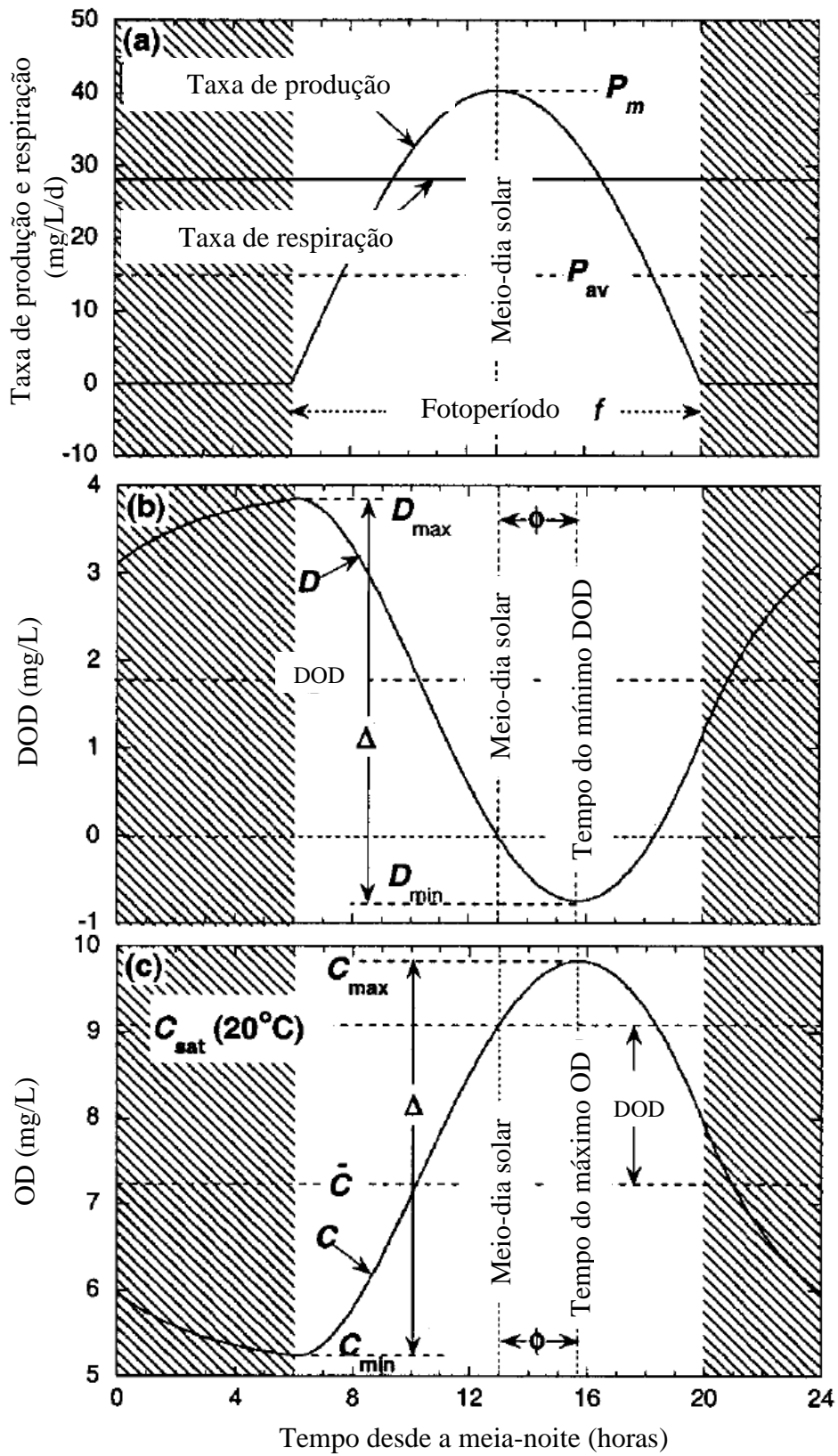
O Método Delta Aproximado pode ser definido como um procedimento simples para o cálculo simultâneo do coeficiente reaeração, taxa de produção primária e taxa de respiração, em uma seção de um rio com perfil diurno de OD (MCBRIDE E CHAPRA, 2005).

A curva para a análise do perfil do OD (Figura 4) desenvolvida por McBride e Chapra (2005) mostra que tanto a concentração de OD mínima como a máxima ocorrem durante o fotoperíodo, sendo o mínimo entre o nascer e o meio-dia solar, e o máximo entre o meio-dia solar e o pôr do sol.

Conforme a figura 4 (b) observa-se algumas características fundamentais na curva: (i) o deslocamento vertical da curva do DOD dado pela interação da reaeração, produção e respiração; (ii) o intervalo da vertical Δ definido pela reaeração e variação da taxa de fotossíntese; (iii) e o tempo entre o meio-dia solar e o mínimo DOD (Φ), função da taxa de reaeração (CHAPRA e DI TORO, 1991).

Dessa forma, o k_2 é função apenas do tempo entre o mínimo DOD e o meio-dia solar e do comprimento do fotoperíodo, independendo da taxa de produção primária e respiração. Podendo ser calculado com o perfil de OD durante o fotoperíodo e o intervalo do fotoperíodo, por meio da equação 5 (MCBRIDE e CHAPRA, 2005).

Figura 4 - Variáveis para estimativa do OD



Legenda: (a) Produção aquática e respiração; (b) DOD; (c) Concentração de OD.

Fonte: Adaptada de McBride e Chapra (2005)

$$k_2 = 7,5 \cdot \left(\frac{5,3 \cdot \eta - \Phi}{\eta \cdot \Phi} \right)^{0,85} \quad (5)$$

sendo:

- k_2 : coeficiente de reaeração (d^{-1});
- Φ : tempo entre o mínimo DOD e o meio-dia solar (horas), equação 6;
- η : fator de correção do fotoperíodo (adimensional), equação 7,

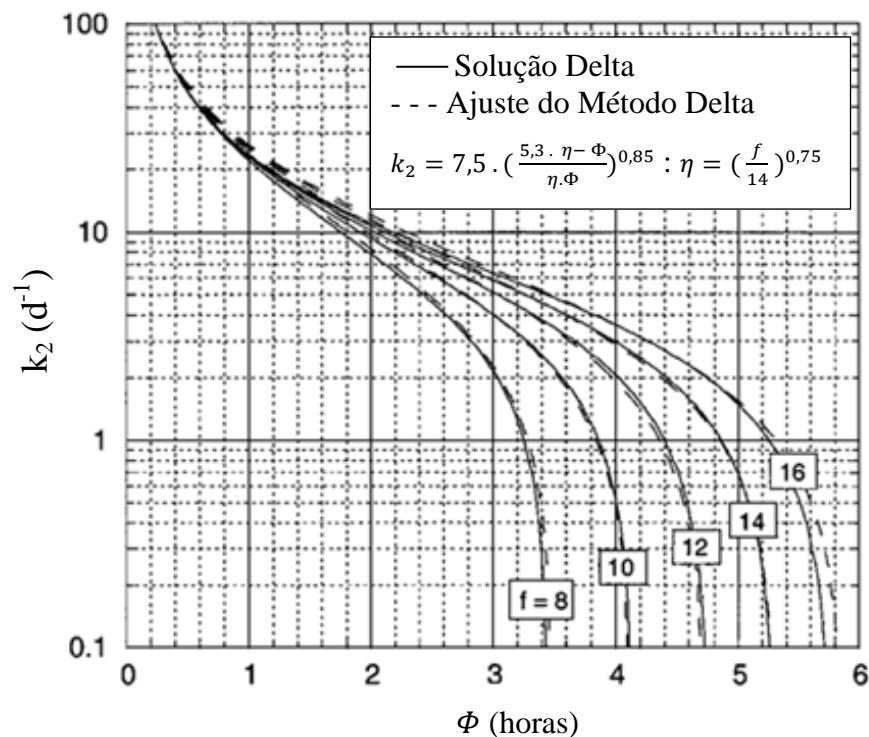
em que,

$$\Phi = t_{min} - \left(\frac{f}{2} \right) \quad (6)$$

$$\eta = \left(\frac{f}{14} \right)^{0,75} \quad (7)$$

e f correspondente a duração do fotoperíodo (horas) e t_{min} é o tempo em que ocorre o mínimo DOD. A figura 5 apresenta o gráfico do fator de correção do fotoperíodo, realizada pela equação 5.

Figura 5 - Gráfico do k_2 (d^{-1}) versus Φ (horas) ao longo do fotoperíodo f (horas) para o Método Delta Aproximado



Uma vez que o k_2 é conhecido, a taxa de produção primária diária e a taxa de respiração podem ser determinadas, conforme as equações 8 e 9, respectivamente.

$$P_{av} = \left(\frac{\eta \cdot \Delta}{16} \right) \cdot (33 + k_2^{1,5}) \quad (8)$$

sendo:

- P_{av} : taxa de produção primária de oxigênio (mg/L/d);
- Δ : variação diurna diária ($\Delta = D_1(t)|_{t=t_{max}} - D_1(t)|_{t=t_{min}}$);
- η : fator de correção do fotoperíodo;
- k_2 : coeficiente de reaeração (d^{-1}).

$$R = P_{av} + k_2 DOD \quad (9)$$

sendo:

- R : taxa de respiração (mg/L/d);
- P_{av} : taxa de produção primária de oxigênio (mg/L/d);
- k_2 : coeficiente de reaeração (d^{-1});
- DOD : déficit de OD médio diurno.

O Método Delta Aproximado foi proposto a partir do Método Delta. O Método Delta foi aplicado no Rio Grand por Chapra e Di Toro (1991). O'Connor e Di Toro (1970) já haviam aplicado sua equação para determinação do k_2 nesse rio. A tabela 2 sintetiza as características relatadas por O'Connor e Di Toro (1970) para o Rio Grand.

Tabela 2 - Características do Rio Grand em Agosto de 1960, sintetizada por O'Connor e Di Toro (1970)

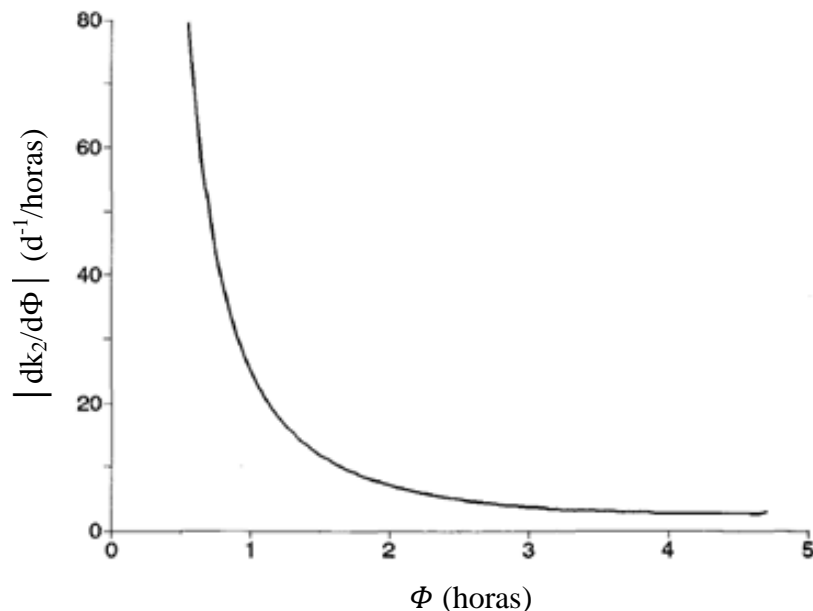
Característica	Valor
Profundidade (m)	0,58
Vazão (m^3/s)	8,35
Temperatura da água ($^{\circ}C$)	25,9
OD (mg/L)	8,13
Nascer do sol (horas)	07h00min
Duração do Fotoperíodo (horas)	13
Meio-dia solar (horas)	13h30min

Fonte: Adaptada de Chapra (1997)

O fator sensibilidade do Método Delta é mostrado na figura 6. Com base na análise de sensibilidade, o método é particularmente eficaz para fluxos com taxas de reaeração baixas. Tais rios são geralmente profundos e com velocidades baixas. Em rios altamente aerados deve-se usar o método com cautela. A determinação do k_2 é sensível para Φ baixos, podendo acarretar em erros nos valores do k_2 . Por exemplo, para um $\Phi = 1$ hora o fator sensibilidade apresenta um erro de ± 15 minutos, ou seja, aproximadamente $6,75 \text{ d}^{-1}$ (CHAPRA e DI TORO, 1991).

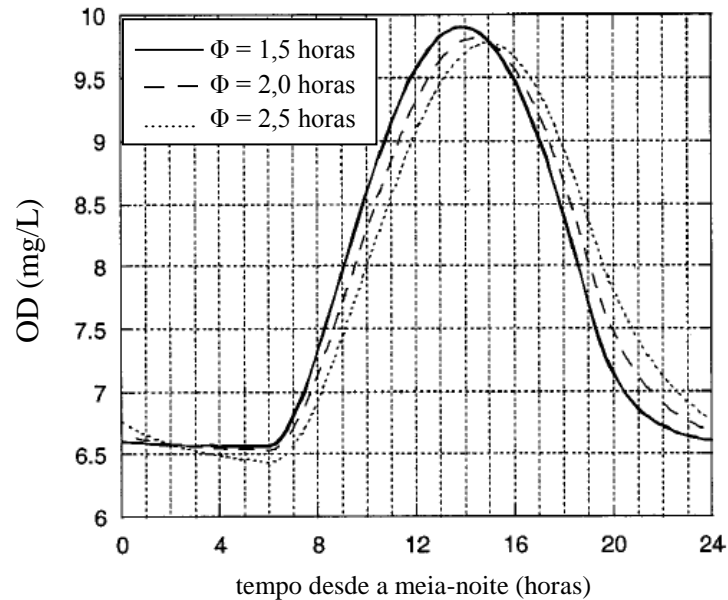
Segundo McBride e Chapra (2005) essa sensibilidade a baixos valores de Φ pode ser parcialmente compensada, tanto com o Método Delta ou com o Método Delta Aproximado. A figura 7 expõe uma forte evidência da importância da união dos três parâmetros (P_{av} , k_2 , R) em uma curva diurna para o OD, prevista usando as soluções analíticas do Método Delta com três conjuntos de parâmetros derivados por aplicação do Método Delta Aproximado ao Córrego Mangoronga. Cada união dos parâmetros usados no gráfico possui valores diferentes, mas com cálculos de OD semelhantes. O Método Delta Aproximado pode ser mais flexível do que os métodos que requerem valores particulares dos parâmetros.

Figura 6 - Fator Sensibilidade $dk_2/d\Phi$ ($\text{d}^{-1}/\text{horas}$) versus Φ (horas) para a estimativa do k_2 pelo Método Delta, sendo $f = 12$ horas



Fonte: Adaptada de Chapra e Di Toro (1991)

Figura 7 - Curvas de OD diurno prevista utilizando as soluções analíticas do Método Delta com três conjuntos de parâmetros derivados por aplicação do Método Delta Aproximado ao Córrego Mangoronga.



Nota: [$T = 20^{\circ}\text{C}$, $\Delta = 3,4 \text{ mg/L}$, $\bar{D} = 1,3 \text{ mg/L}$ - Wilcock et al. (1998)] com três opções para Φ : (1) $\Phi = 1,5$ horas ($k_2 = 16,2 \text{ d}^{-1}$, $P_{av} = 19,8 \text{ mg/L/d}$, $R = 40,8 \text{ mg/L/d}$); (2) $\Phi = 2,0$ horas ($k_2 = 11,1 \text{ d}^{-1}$, $P_{av} = 14,1 \text{ mg/L/d}$, $R = 28,6 \text{ mg/L/d}$); (3) $\Phi = 2,5$ horas ($k_2 = 7,9 \text{ d}^{-1}$, $P_{av} = 11,1 \text{ mg/L/d}$, $R = 21,4 \text{ mg/L/d}$).

Fonte: Adaptada de McBride e Chapra (2005)

3.6 ESTUDOS DE DETERMINAÇÃO DO k_2

Há na literatura uma grande diversidade de trabalhos referente à determinação do k_2 , nesse item serão apresentados alguns estudos, que seguem:

- Chapra e Di Toro (1991) aplicaram o Método Delta no Rio Grand, devido a O'Connor e Dobbins em 1970 terem estudado o mesmo rio por meio de outra técnica matemática semelhante, assim favorecendo uma comparação das abordagens. Com a metodologia proposta por O'Connor e Dobbins (1970) obtiveram o valor de $5,5 \text{ d}^{-1}$ para o k_2 e com o Método Delta $2,7 \text{ d}^{-1}$, sendo coeficientes com valores próximos, segundo Chapra e Di Toro (1991);

- Correa-González et al. (2014) em um estudo sobre o k_2 em rios por meio do Método Delta, monitoraram a concentração de OD e a temperatura no período diurno, desde o amanhecer até aproximadamente ao pôr do sol. Em seus resultados, afirmaram que o OD se eleva durante o dia, ocorrendo seu valor máximo em torno das 13h40min. Os autores obtiveram como resultado para o k_2 o valor médio de $23,74 \text{ d}^{-1}$ para cinco dias analisados, e concluíram que a temperatura possui influência no coeficiente;

- Ávila (2014) utilizou o Método Delta Aproximado, proposto por McBride e Chapra (2005) para determinar o k_2 em três pontos de monitoramento no Rio Vacacaí-Mirim na cidade de Santa Maria-RS, e posteriormente analisou o k_2 juntamente com as características hidrodinâmicas do rio. A autora observou valores para o k_2 bastante variados, com valores de $11,15 \text{ d}^{-1}$ até $81,17 \text{ d}^{-1}$, sendo a ausência de uniformidade devido à presença de descargas de esgoto no local em estudo. Também relatou que as variações de vazão interferem nos valores finais de OD, devido às vazões maiores gerarem uma maior capacidade de autodepuração no rio, refletindo em variações menores de OD ao longo do dia. Enfim, Ávila (2014) concluiu que a utilização do Método Delta Aproximado é uma técnica de fácil aplicação, porém com limitações em áreas de estudo com despejos de esgoto;

- Pinheiro et al. (2012) realizaram um estudo sobre a determinação do k_2 em rios por meio do método dos traçadores gasosos, utilizando o GLP. Os ensaios foram realizados em trechos de rios com características hidrodinâmicas distintas. Os autores constataram uma forte relação entre os dados hidráulicos e os k_2 . Nos trechos foram observadas taxas de reaeração altas e baixas, com valor mínimo encontrado para o k_2 de $25,8 \text{ d}^{-1}$, para uma vazão de $4,485 \text{ m}^3/\text{s}$, e máximo de $367,7 \text{ d}^{-1}$, para uma vazão de $0,022 \text{ m}^3/\text{s}$. A utilização do gás GLP foi viável na determinação do k_2 , tanto do ponto de vista analítico quanto econômico;

- Em um estudo sobre o k_2 e a desoxigenação no Rio Vacacaí-Mirim em Santa Maria - RS, Formentini (2010) determinou o k_2 em dois trechos do rio por meio da metodologia dos traçadores gasosos, utilizando o propano como traçador gasoso e a rodamina-WT como traçador de referência. O autor realizou duas campanhas para determinar o k_2 , obtendo variação de $30,30 \text{ d}^{-1}$ e $14,91 \text{ d}^{-1}$, no trecho 1, e $24,77 \text{ d}^{-1}$ e $12,73 \text{ d}^{-1}$, para o trecho 2. Segundo o autor a utilização do método dos traçadores gasosos foi satisfatória, porém apresentou a limitação da baixa profundidade do rio, que prejudicou a absorvidade do gás;

- Laenen e Woo (1994) determinaram o k_2 por meio do método dos traçadores gasosos no Rio Umpqua (Estados Unidos), também usando a rodamina-WT e o gás propano. Em seus resultados pelo método dos traçadores, obtiveram valores variando de $1,03$ a $8,35 \text{ d}^{-1}$ para uma vazão de $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$;

- Giorgetti e Schulz (1986) realizaram um estudo sobre o k_2 em rios, por meio de uma sonda constituída por material sólido e solúvel em água, que quantifica a turbulência junto a superfície, supostamente responsável pelo processo de transferência de oxigênio por meio da interface ar-água. Em seus resultados observaram que o k_2 variou em função da vazão, apresentando uma boa correlação;

- Almeida (2013) determinou o k_2 por meio da modelagem matemática em diferentes seções do Rio Uberabinha no município de Uberlândia-MG, sendo utilizado as equações empíricas de O'Connor e Dobbins (1958), Owens et al. (1964) e Melching e Flores (1999). O autor obteve valores para o k_2 de 0,83 (equação de O'Connor e Dobbins (1958)) a 60,33 d^{-1} (equação de Owens et al. (1964)). O mesmo observou que a equação de O'Connor e Dobbins (1958) ajustou-se melhor nas seções com profundidade elevada, e as equações de Owens et al. (1964) e Melching e Flores (1999) ajustaram-se melhor nas seções com velocidade elevada do rio e escoamento raso da lâmina. Dessa forma, o mesmo concluiu que os valores do k_2 variaram de forma significativa, devido às características hidrodinâmicas de cada seção do rio;

- Horn et al. (2013) em um estudo sobre a determinação do k_2 em um pequeno rio de encosta, utilizou as equações empíricas de Owens et al. (1964) e Parker e Gay (1987) e a equação do modelo de autodepuração Streeter e Phelps (1925). Os resultados obtidos pelas equações de Owens et al. (1964) e Parker e Gay (1987) não se apresentaram representativos para as características hidráulicas do córrego em estudo, apresentando valores extremamente altos, variando de 34,49 a 232,86 d^{-1} . Os resultados encontrados pelo modelo de Streeter e Phelps foram de 3,31 a 8,69 d^{-1} , semelhantes aos encontrados na bibliografia;

- Matos et al. (2011) realizaram um estudo comparativo do k_2 em períodos secos e chuvosos em três diferentes trechos do Rio Pomba em Minas Gerais, objetivando determinar o k_2 e relacioná-lo com algumas características hidrodinâmicas do trecho. O k_2 foi determinado pela equação de Streeter-Phelps, substituindo-se as seguintes variáveis na equação: temperatura da água, altitude local, concentração de OD no ponto da mistura, DBO, velocidade, valor do coeficiente de desoxigenação, distância percorrida e concentração de OD no final do trecho. Os valores obtidos para o k_2 foram de 0,4 a 2,0 d^{-1} no período seco e no período chuvoso 0,6 a 0,9 d^{-1} . O trecho com maior turbulência e raso obteve valores mais elevados, com uma média de 1,23 d^{-1} e nos outros dois trechos com maior profundidade obteve-se um valor médio de 0,65 d^{-1} ;

- Queiroz et al. (2015) realizaram um estudo com o objetivo de analisar a reoxigenação da água limpa em um canal hidráulico de fundo deslizante, com profundidades pequenas de água e velocidades de escoamento variadas, e inferir sobre as principais variáveis hidrodinâmicas que influenciam no processo. No estudo foram utilizadas diferentes equações de k_2 e seus resultados comparados com os medidos pelos autores no canal hidráulico. Os autores observaram que maiores k_2 (21,9 d^{-1}) foram obtidos em lâminas de água menores, associada com maior velocidade. Verificaram uma elevada discrepância entre as equações;

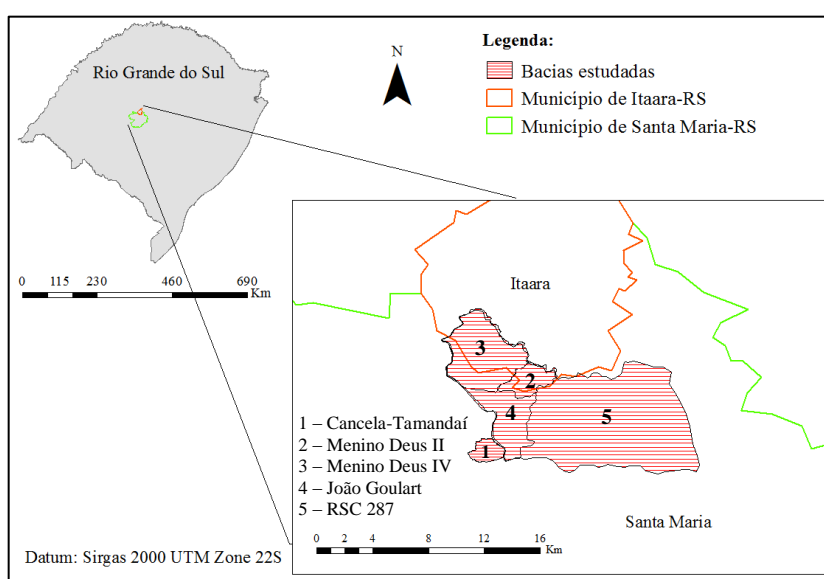
4 MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir os objetivos deste trabalho foram escolhidas cinco bacias hidrográficas na região central do Rio Grande do Sul (RS). Foram determinados os perfis de OD diurnos, nas seções fluviométricas de cada bacia hidrográfica em estudo, assim como outras variáveis hidrodinâmicas e de qualidade necessárias. Os perfis de OD diurnos foram utilizados para determinação do valor do k_2 , por meio do Método Delta Aproximado. Nesta etapa do trabalho foi possível determinar algumas limitações do método aplicado. Com as informações obtidas foi possível propor novas equações para determinar o k_2 a partir de características hidrodinâmicas. A descrição das bacias hidrográficas escolhidas para o estudo, assim como o detalhamento das metodologias utilizadas em cada etapa são descritas a seguir.

4.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS ESTUDADAS

O estudo foi realizado em cinco bacias hidrográficas: (i) na bacia hidrográfica do Arroio Cancela-Tamandaí; (ii) na bacia Menino Deus II; (iii) na bacia Menino Deus IV; (iv) na bacia João Goulart; (v) e na bacia RSC 287. Todas as bacias hidrográficas estão localizadas nos municípios de Santa Maria e Itaara, região central do Rio Grande do Sul. A figura 8 apresenta a localização das bacias hidrográficas estudadas.

Figura 8 - Localização das bacias hidrográficas

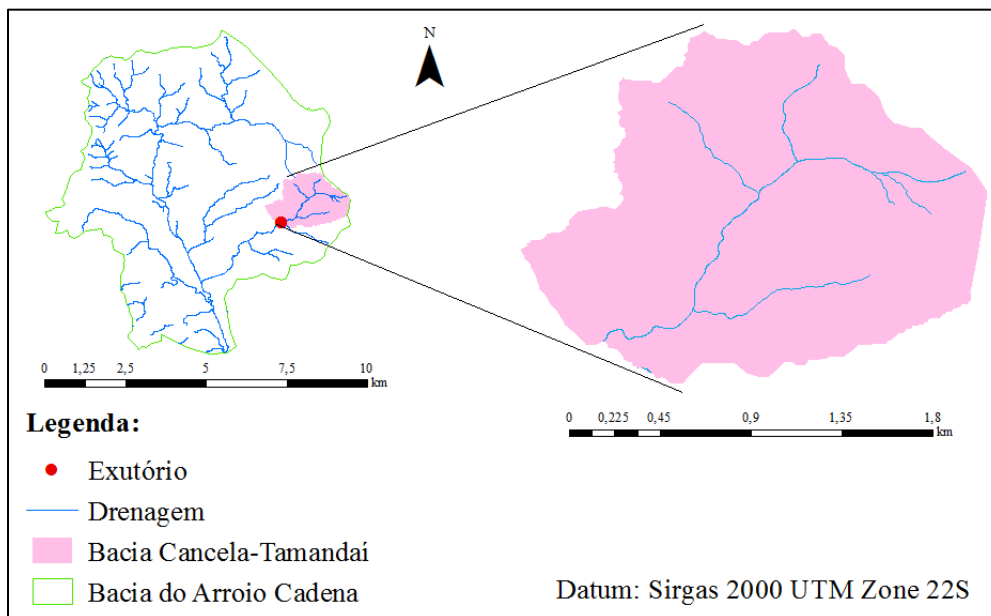


Fonte: A autora

4.1.1 Bacia Hidrográfica Cancela-Tamandaí

A bacia hidrográfica do arroio Cancela-Tamandaí está situada na área urbana da cidade de Santa Maria, RS. O Arroio Cancela-Tamandaí é um afluente do arroio Cadena (Figura 9), pertencente à bacia do Rio Vacacaí. O exutório da bacia, onde se encontra a seção fluviométrica, está nas coordenadas geográficas 53°47'11" de longitude oeste e 29°42'07" de latitude sul, com uma altitude de 92 metros, definindo uma área de drenagem de 2,7 km². A figura 10 mostra a seção fluviométrica, em que se determinou o perfil de OD, as características hidrodinâmicas e a carga orgânica.

Figura 9 - Bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí



Fonte: A autora

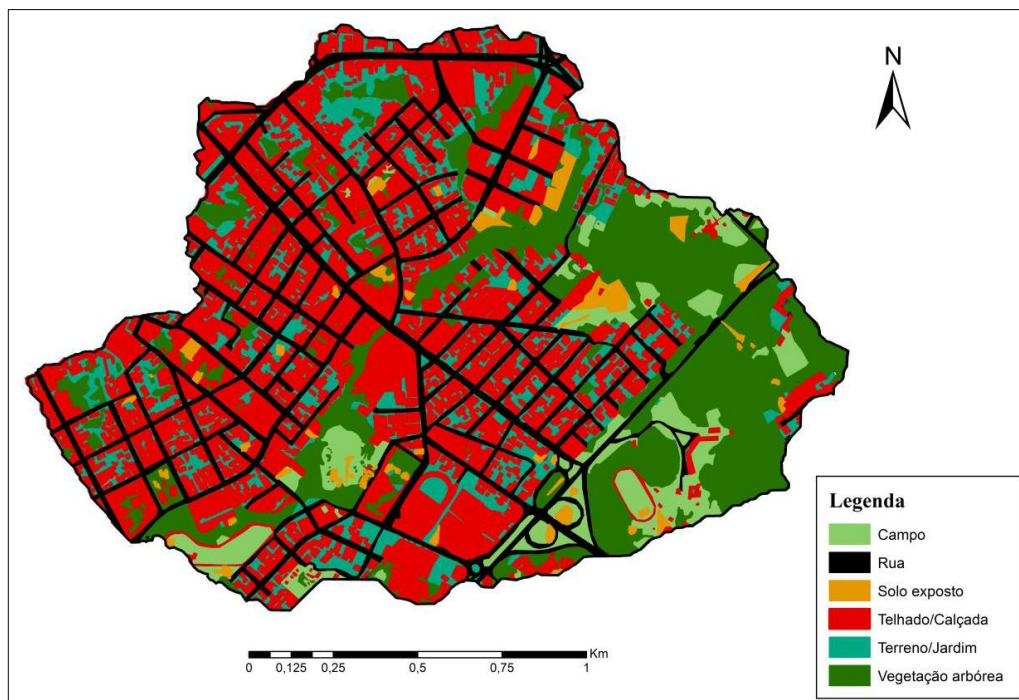
O uso do solo na bacia Cancela-Tamandaí está representado na figura 11. A bacia apresenta um percentual de aproximadamente 51% de áreas impermeáveis, ou seja, ruas e telhados/calçadas (SANTOS, 2014). Na tabela 3 observam-se as áreas e os percentuais do uso do solo.

Figura 10 - Seção fluviométrica da bacia Cancela-Tamandaí



Fonte: A autora

Figura 11 - Uso do solo na bacia Cancela-Tamandaí



Fonte: Santos (2014)

Tabela 3 - Áreas e percentuais do uso do solo da bacia Cancela-Tamandaí

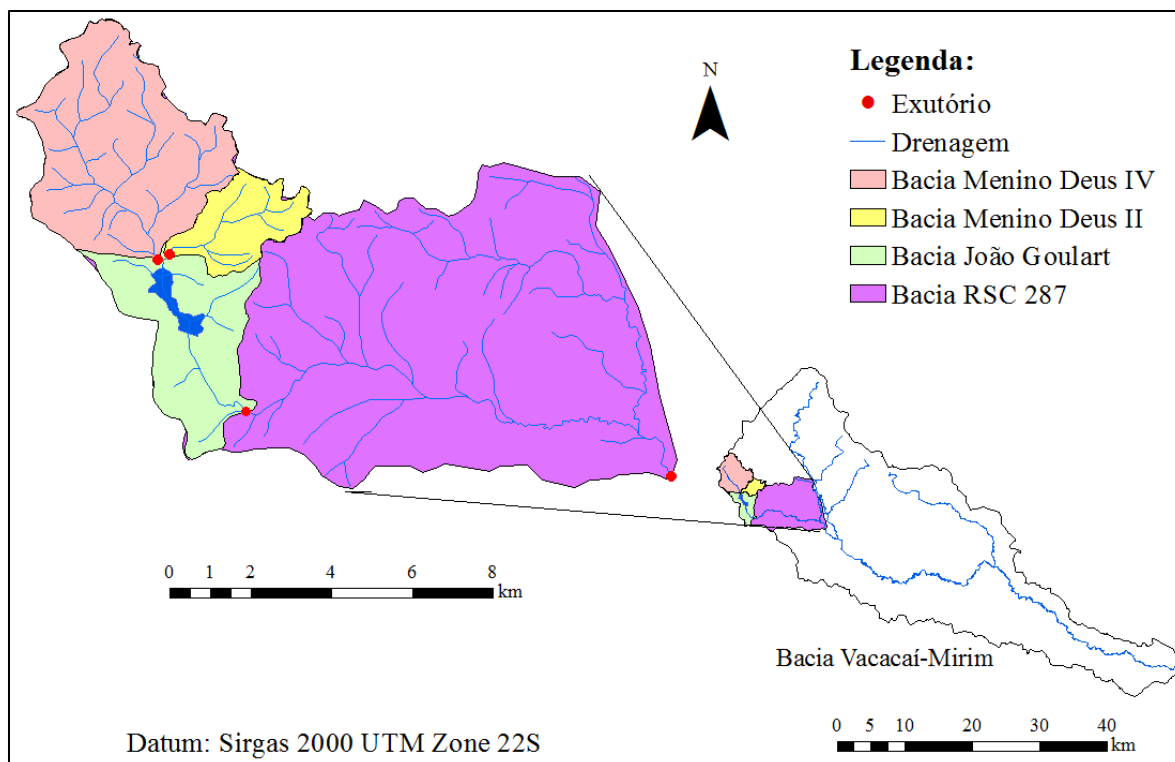
Classe do uso do solo	Área (km ²)	Percentual %
Vegetação arbórea	0,64	23,52
Campo	0,18	6,48
Rua	0,42	15,37
Solo exposto	0,06	2,04
Telhado/calçada	0,96	35,37
Terreno/jardim	0,47	17,22

Fonte: Adaptada de Santos (2014)

4.1.2 Bacias Hidrográficas Menino Deus II, Menino Deus IV, João Goulart e RSC 287

As bacias Menino Deus II, Menino Deus IV, João Goulart e RSC 287 são bacias aninhadas, pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim. Estas bacias podem ser vistas na figura 12. Utilizou-se o software ArcMap versão 10.1 para elaboração dos mapas de localização e de usos do solo. A seguir são apresentadas as características individuais das bacias.

Figura 12 - Bacias hidrográficas Menino Deus II, Menino Deus IV, João Goulart e RSC 287



Fonte: A autora

4.1.2.1 Bacia Hidrográfica Menino Deus II

O exutório da bacia Menino Deus II, onde se encontra a seção fluviométrica, está localizado nas coordenadas geográficas 29°39'28" de latitude Sul e 53°47'19" de longitude Oeste, com altitude de 140 metros, e área de drenagem de 5,07 km² (Figura 12). A figura 13 apresenta a seção fluviométrica, em que foram determinados os perfis de OD, as características hidrodinâmicas e a carga orgânica.

A tabela 4 apresenta os percentuais e áreas das classes de uso do solo na bacia Menino Deus II, e a figura 14 mostra o mapa de uso do solo. Observa-se que a bacia possui maior percentual de área com vegetação arbórea e campo, e pouco predomínio de habitação urbana.

Figura 13 - Seção fluviométrica da bacia Menino Deus II



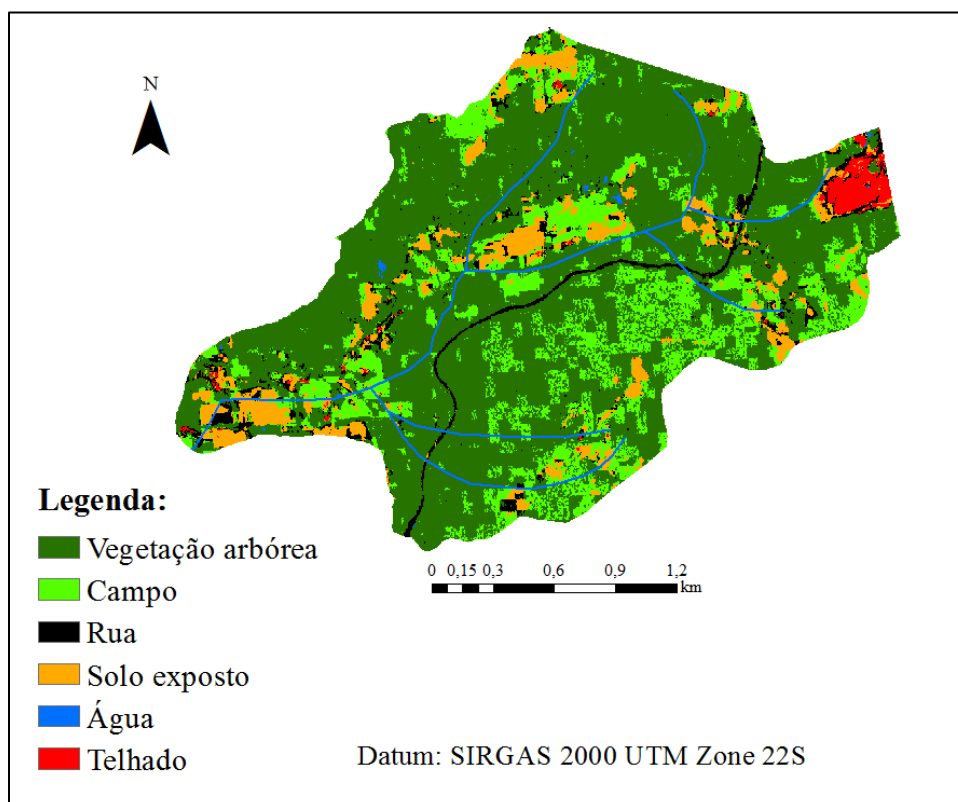
Fonte: A autora

Tabela 4 - Classes do uso do solo na bacia Menino Deus II

Classe do uso do solo	Área (km ²)	Percentual %
Vegetação arbórea	3,232	66,485
Campo	0,941	19,350
Rua	0,212	4,353
Solo exposto	0,395	8,130
Telhado/calçada	0,075	1,537

Fonte: A autora

Figura 14 - Uso do solo na bacia Menino Deus II



Fonte: A autora

4.1.2.2 Bacia Hidrográfica Menino Deus IV

O exutório da bacia Menino Deus IV, onde se encontra a seção fluviométrica, está localizado nas coordenadas geográficas 29°39'29" de latitude Sul e 53°47'23" de longitude Oeste, com altitude de 139 metros. A bacia abrange uma área de drenagem de 19,70 km² (Figura 12). A figura 15 apresenta a seção fluviométrica, em que foram levantados os perfis de OD, as características hidrodinâmicas e a carga orgânica.

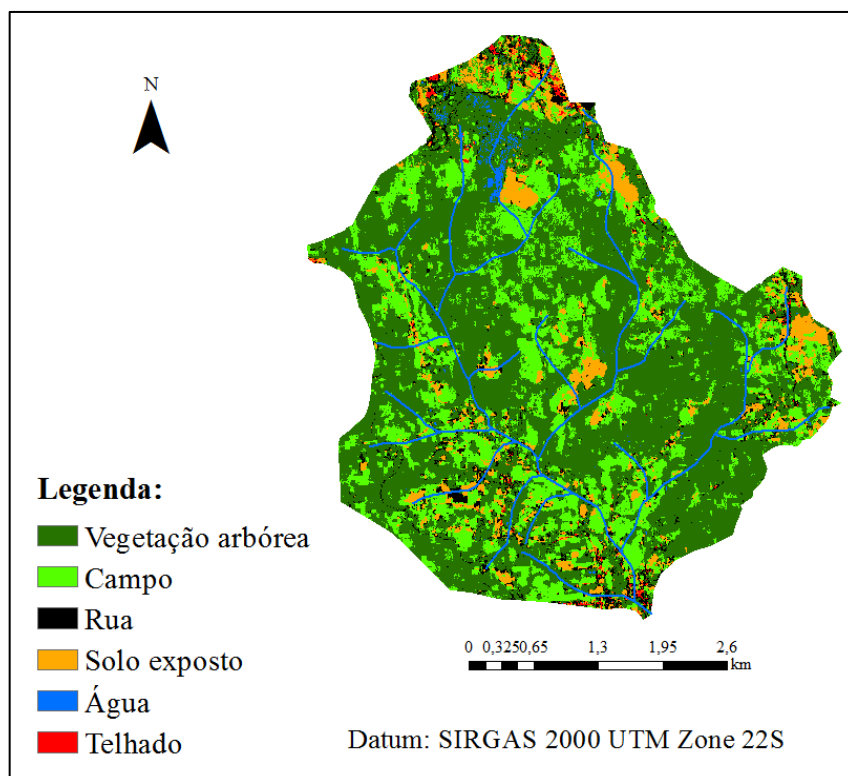
A figura 16 apresenta o uso do solo na bacia hidrográfica Menino Deus IV, e a tabela 5 os percentuais e áreas de suas classes de uso. Observa-se na bacia um maior percentual de vegetação arbórea e campo, com pouca habitação urbana.

Figura 15 - Seção fluviométrica da bacia Menino Deus IV



Fonte: A autora

Figura 16 - Uso do solo na bacia Menino Deus IV



Fonte: A autora

Tabela 5 - Classes do uso do solo na bacia Menino Deus IV

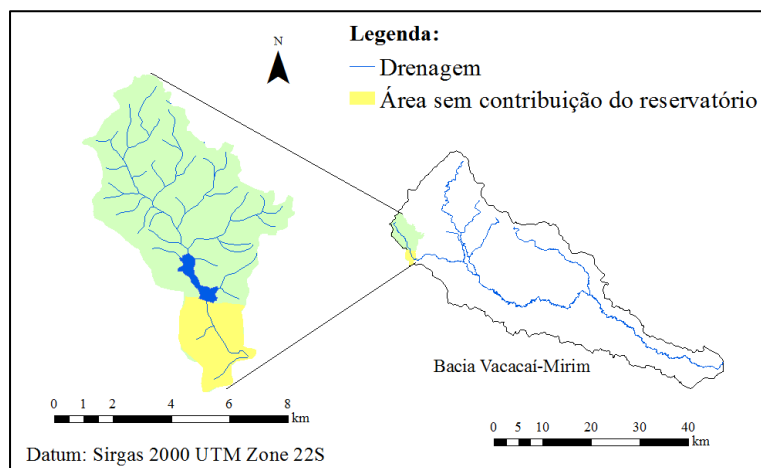
Classe do uso do solo	Área (km²)	Percentual %
Vegetação arbórea	11,447	60,877
Campo	4,895	26,033
Rua	0,825	4,390
Solo exposto	1,410	7,500
Telhado/calçada	0,117	0,622

Fonte: A autora

4.1.2.3 Bacia hidrográfica João Goulart

O exutório da bacia João Goulart, onde se encontra a seção fluviométrica, está localizado nas coordenadas geográficas 29°41'26" de latitude Sul e 53°46'5" de longitude Oeste, e altitude de 107 metros. A área de drenagem da bacia é de 36,17 km² (Figura 12). Nesta bacia está inserido o reservatório de captação de água para abastecimento público da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), que possui uma área de contribuição de 30,70 km². Desta maneira, as vazões a jusante do reservatório possuem a interferência do processo de extravasamento pelo vertedor do reservatório. Assim, pode-se considerar a área de contribuição da bacia como variável. Quando não há saída de vazão pelo vertedor do reservatório a área de drenagem da bacia passa a ser 5,47 km². A figura 17 mostra a área da bacia hidrográfica sem contribuição do reservatório, e a figura 18 mostra a seção fluviométrica, em que foram determinados os perfis de OD, as características hidrodinâmicas e a carga orgânica.

Figura 17 - Área da bacia João Goulart sem contribuição do reservatório da CORSAN



Fonte: A autora

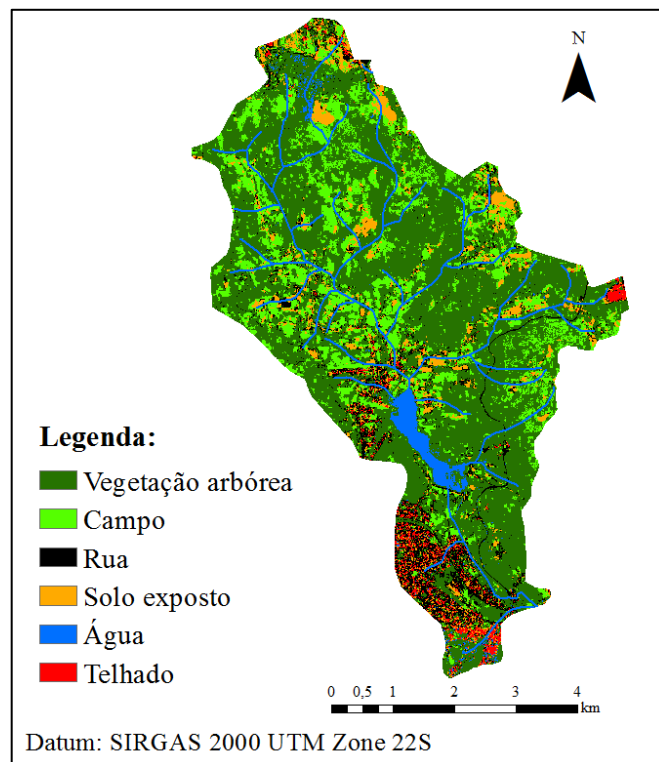
Figura 18 - Seção fluviométrica da bacia João Goulart



Fonte: A autora

A figura 19 apresenta o uso do solo na bacia hidrográfica João Goulart e a tabela 6 os percentuais e áreas das classes de uso. Observa-se um maior percentual de vegetação arbórea e campo, havendo próximo ao exutório um elevado predomínio de população urbana.

Figura 19 - Uso do solo na bacia João Goulart



Fonte: A autora

Tabela 6 - Classes do uso do solo na bacia João Goulart

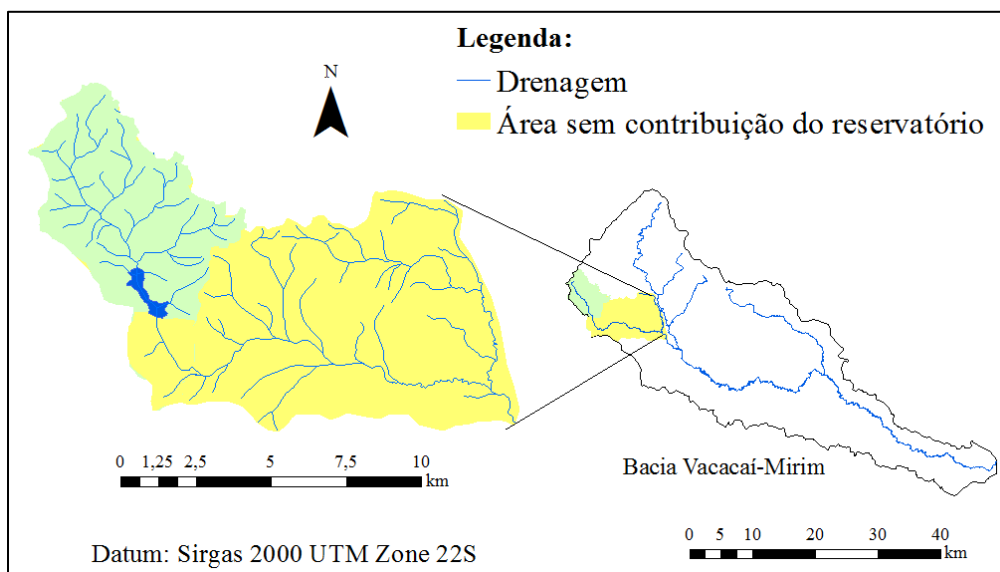
Classe do uso do solo	Área (km ²)	Percentual %
Vegetação arbórea	20,989	60,639
Campo	6,970	20,137
Rua	2,774	8,014
Solo exposto	2,395	6,921
Telhado/calçada	0,751	2,171

Fonte: A autora

4.1.2.4 Bacia hidrográfica RSC 287

O exutório da bacia RSC 287, onde se encontra a seção fluviométrica, está localizado nas coordenadas geográficas 29°42'36" de latitude Sul e 53°39'39" de longitude Oeste, e altitude de 70 metros, sob a RSC 287. Desta maneira, neste trabalho esta bacia será nomeada de RSC 287. A área de drenagem da bacia é de 99,71 km², conforme a figura 12. Pelo fato das bacias serem aninhadas, na bacia RSC 287 também está inserido o reservatório de captação de água da CORSAN, que possui uma área de contribuição de 30,70 km², quando não há saída de vazão pelo vertedor do reservatório a área da bacia passa a ser 69,01 km². A figura 20 mostra a área da bacia com ausência de contribuição do reservatório. A figura 21 apresenta a seção fluviométrica, em que foram obtidos os perfis de OD, as características hidrodinâmicas e a carga orgânica.

Figura 20 - Área da bacia RSC 287 sem contribuição do reservatório da CORSAN



Fonte: A autora

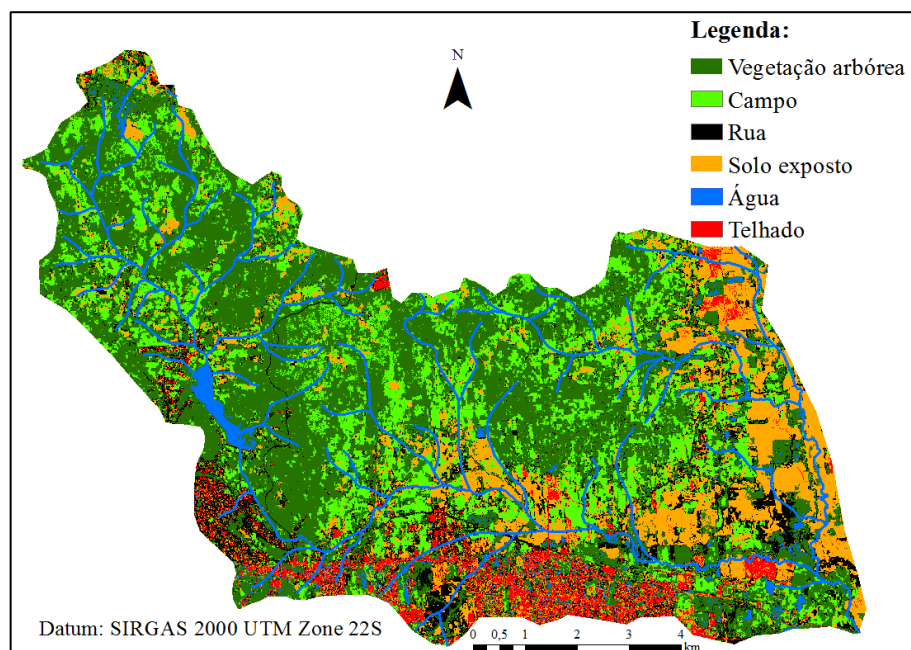
Figura 21 - Seção fluviométrica da bacia RSC 287



Fonte: A autora

A figura 22 apresenta o uso do solo na bacia hidrográfica RSC 287 e a tabela 7 as áreas e percentuais das classes de uso. Observa-se um maior percentual de vegetação arbórea e campo na bacia. No entanto, há também a presença do cultivo de arroz (Figura 23). Os agricultores utilizam a água do Rio Vacacaí-Mirim para fazer a irrigação das lavouras, próximo da seção fluviométrica há duas captações de água (Figuras 24 e 25).

Figura 22 - Uso do solo na bacia RSC 287



Fonte: A autora

Tabela 7 - Classes do uso do solo na bacia RSC 287

Classe do uso do solo	Área (km²)	Percentual %
Vegetação arbórea	45,196	45,328
Campo	21,123	21,184
Rua	10,653	10,684
Solo exposto	16,217	16,265
Telhado/calçada	4,660	4,674

Fonte: A autora

Figura 23 - Lavoura de arroz com irrigação



Fonte: A autora

Figura 24 - Captação de água para irrigação de lavouras de arroz



Fonte: A autora

Figura 25 - Captação de água na bacia, campanha realizada no dia 19/01/2016



Fonte: A autora

4.2 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS

Nas bacias Cancela-Tamandaí, Menino Deus II e João Goulart as vazões foram determinadas por meio de curvas-chave. Assim, para a determinação da vazão na seção fluviométrica da bacia Cancela-Tamandaí foi utilizada a curva-chave proposta por Santos (2014), da bacia Menino Deus II a curva-chave proposta por Souza (2012), e da bacia João Goulart a curva-chave proposta por Teixeira (2015). Os valores das cotas (H (m)), valores estes necessários para o cálculo da vazão por meio da curva-chave, foram obtidos nas seções fluviométricas das bacias. Estas cotas foram registradas diariamente por meio do equipamento Thalimedes, marca OTT Hydrometrie. O quadro 2 apresenta as curvas-chave das bacias.

Quadro 2 - Curvas-chave para determinar a vazão nas seções fluviométricas das bacias Cancela-Tamandaí, Menino Deus II e João Goulart

Bacia Hidrográfica	Curva-chave	Intervalo de cota
Cancela-Tamandaí	$Q = 3,3404 \cdot (H + 0,02)^{2,0649}$	$0,10 \text{ m} \leq H \leq 1,50 \text{ m}$
Menino Deus II	$Q = 3,3409 \cdot H^{2,2505}$	$0,06 \leq H \leq 0,96 \text{ m}$
João Goulart	$Q = 12,34 \cdot (H - 0,029)^{1,664}$	$H \geq 0,04 \text{ m}$

Na seção fluviométrica da bacia Menino Deus IV as vazões foram determinadas por meio do método da meia seção. Para obter a vazão por este método é necessário dividir a seção do rio em verticais. A tabela 8 apresenta o número de verticais e a distância

recomendada entre elas, para diferentes larguras do rio. Para cada vertical são calculadas vazões parciais, com a multiplicação da velocidade média desta vertical pela área da seção vertical. A área é o produto da profundidade média na vertical e da largura da vertical (SANTOS et al., 2001).

Tabela 8 - Distância recomendada entre as verticais

Largura do rio (m)	Distância entre verticais (m)
≤ 3,0	0,3
3,0 – 6,0	0,5
6,0 – 15,0	1,0
15,0 – 30,0	2,0
30,0 – 50,0	3,0
50,0 – 80,0	4,0
80,0 – 150,0	6,0
150,0 – 250,0	8,0
≥ 250,0	12,0

Fonte: DNAEE, 1967 apud SANTOS et al. (2001)

Determinado o número de verticais, com um molinete hidrométrico e um contador de pulsos, marca OTT Z400, mediu-se a velocidade em cada vertical, conforme a figura 26. O molinete hidrométrico utilizado para determinar a velocidade foi da marca OTT, modelo C2 170997. O mesmo possui dois tipos de hélices, a número 3 e número 6, devendo a mesma ser escolhida conforme a intensidade da velocidade na seção.

Figura 26- Medição da velocidade com o uso do molinete hidrométrico



Fonte: A autora

Na seção fluviométrica da bacia RSC 287 a vazão, a profundidade média e a velocidade média foram determinadas utilizando o equipamento ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), da marca SonTec YSI (Figura 27).

Figura 27 - Medição de vazão, profundidade e velocidade média com a ADCP na seção fluviométrica da bacia RSC 287



Fonte: A autora

Para determinar a velocidade e a profundidade média nas seções fluviométricas das bacias Cancela-Tamandaí, Menino Deus II e João Goulart foram estabelecidas curvas-chave. As curvas-chave foram determinadas a partir dos dados obtidos em campo por: (i) Santos (2014), na bacia Cancela-Tamandaí (Anexo A); (ii) Souza (2012), na bacia Menino Deus II (Anexo B); (iii) e por Teixeira (2015), na bacia João Goulart (Anexo C). Utilizou-se a ferramenta *Solver* do Excel® para fazer o ajuste das curvas.

Na seção fluviométrica da bacia Menino Deus IV a velocidade e a profundidade média foram determinadas pelas equações 10 e 11, respectivamente.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

sendo:

- v : velocidade média (m/s);
- Q : vazão (m³/s);
- A : área molhada total da seção (m²).

$$P = \frac{A}{L} \quad (11)$$

sendo:

- P = profundidade média (m);
- A : área molhada total da seção (m²);
- L : comprimento total da seção (m).

4.3 DETERMINAÇÃO DA CARGA ORGÂNICA

A matéria orgânica foi avaliada eventualmente, como uma maneira de caracterizar o conteúdo orgânico nas bacias hidrográficas. Para caracterizar a carga orgânica nas seções fluviométricas das bacias em estudo escolheu-se o parâmetro DBO. O procedimento empregado para a determinação da DBO seguiu o descrito no Standard Methods for the Examination of the Water and Wastewater (APHA, 2012). Utilizou-se a metodologia analítica de Winkler, com limite de detecção de 0,1 mg/L.

4.4 CAMPANHAS DE MONITORAMENTO

Durante a realização deste estudo foram realizadas sete campanhas na seção fluviométrica da bacia Cancela-Tamandaí, treze campanhas na seção fluviométrica da bacia Menino Deus II, treze campanhas na seção fluviométrica da bacia Menino Deus IV, dezesseis campanhas na seção fluviométrica da bacia João Goulart e sete campanhas na seção fluviométrica da bacia RSC 287. Sendo monitorado o perfil de OD, de temperatura e as características hidrodinâmicas.

4.5 DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE OD E TEMPERATURA DA ÁGUA

O perfil de OD no rio foi determinado a partir de seu monitoramento durante o fotoperíodo, ou seja, desde o nascer até ao pôr do sol. Além da concentração de OD também foi determinada a temperatura (T) da água, ambos os parâmetros medidos a cada 15 ou 20 minutos. Para o monitoramento destes parâmetros foi utilizado um oxímetro, marca YSI Model 58 (Figura 28).

A duração do fotoperíodo foi obtida na estação meteorológica pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia (8º DISME), do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, localizada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Pelo fato de não haver uma estação meteorológica inserida em cada bacia, pode-se haver uma pequena imprecisão nos valores dos fotoperíodos.

Figura 28 - Oxímetro, marca YSI Model 58



Fonte: A autora

4.6 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO - k_2

Para a determinação do k_2 na seção fluviométrica das bacias em estudo foi utilizado o Método Delta Aproximado (MCBRIDE e CHAPRA, 2005), conforme descrito no item 3.5. Para isto foram utilizadas as informações do perfil do OD e fotoperíodo, obtidos conforme o item 4.5.

4.7 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SATURAÇÃO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO E DÉFICIT DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO

A concentração de saturação de OD na altitude (C_s) é função da temperatura da água e da altitude, havendo fórmulas empíricas que fornecem diretamente seu valor. A C_s foi determinada em cada campanha por meio das equações 12 (PÖPEL, 1979 apud VON

SPERLING, 2014) e 13 (QASIM, 1985 apud VON SPERLING, 2014). O DOD foi determinado por meio da equação 1.

$$C_s' = 14,652 - 4,1022 \times 10^{-1} \cdot T_{m\u00e9dia} + 7,9910 \times 10^{-3} \cdot T_{m\u00e9dia}^2 - 7,7774 \times 10^{-5} \cdot T_{m\u00e9dia}^3 \quad (12)$$

sendo:

- C_s' = concentração de saturação de OD (mg/L);
- $T_{m\u00e9dia}$ = temperatura m\u00e9dia di\u00e1ria ($^{\circ}$ C).

$$\frac{C_s}{C_s'} = \left(1 - \left(\frac{altitude}{9450} \right) \right) \quad (13)$$

sendo:

- C_s = concentra\u00e7\u00e3o de saturação na altitude (mg/L);
- *Altitude* = altitude (m).

4.8 CORRELA\u00c7\u00c3O DE PEARSON

O k_2 foi correlacionado com todas as vari\u00e1veis determinadas neste estudo. Utilizou-se o software Action 2.9 integrado ao Excel[®] para calcular a Correla\u00e7\u00e3o de Pearson.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões apresentados a seguir referem-se às características hidrodinâmicas e carga orgânica analisadas nas seções fluviométricas das bacias estudadas. Ao comportamento dos perfis de OD, e as condições de viabilidade da utilização do Método Delta Aproximado na determinação do k_2 . Assim como, a correlação das variáveis analisadas com os k_2 determinados nas seções fluviométricas das bacias.

5.1 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS E CARGA ORGÂNICA

As características hidrodinâmicas e de carga orgânica foram determinadas com o objetivo de serem relacionadas com o k_2 . Nas bacias em que as características hidrodinâmicas foram obtidas por meio de curvas-chave, estas foram calculadas ao término do processo de determinação do k_2 . A seguir são apresentados os resultados das características hidrodinâmicas (vazão, velocidade média e profundidade média) para as seções fluviométricas das bacias estudadas, seguido dos resultados de carga orgânica. Os resultados referentes à carga orgânica estão representados por meio de determinações de DBO.

5.1.1 Características hidrodinâmicas

As características hidrodinâmicas analisadas foram vazão, profundidade média e velocidade média. Nas seções fluviométricas das bacias Cancela-Tamandaí, Menino Deus II e João Goulart foi necessário determinar curvas-chave para a determinação da profundidade média e da velocidade média. As curvas-chave apresentaram bons ajustes e podem ser vistas nos quadros 3 e 4.

Quadro 3 - Curvas-chave de profundidade média para as seções fluviométricas das bacias Cancela-Tamandaí, Menino Deus II e João Goulart

Bacia Hidrográfica	Curva-chave	R ²	Intervalo de cota
Cancela-Tamandaí	$P = -0,4973.(H+0,02)^2 + 1,5486.$ $(H+0,02) - 0,1216$	0,985800	$0,14 \leq H \leq 1,5$ m
Menino Deus II	$P = 0,7698.H^{1,1441}$	0,968002	$0,06 \leq H \leq 0,96$ m
João Goulart	$P = 1,3335.(H-0,029)^{0,7658}$	0,876655	$H \geq 0,04$ m

Legenda: P – profundidade média (m); H – cota (m).

Quadro 4 - Curvas-chave de velocidade média para as seções fluviométricas das bacias Cancela-Tamandaí, Menino Deus II e João Goulart

Bacia Hidrográfica	Curva-chave	R ²	Intervalo de cota
Cancela-Tamandaí	$v = 0,1655.(H+0,02)^2 + 0,3517 . (H+0,02) + 0,1498$	0,905847	$0,14 \leq H \leq 1,5$ m
Menino Deus II	$v = 2,1052.H^{1,0761}$	0,901460	$0,06 \leq H \leq 0,96$ m
João Goulart	$v = 1,6578.(H-0,029)^{0,8918}$	0,750900	$H \geq 0,04$ m

Legenda: v – velocidade média (m/s); H – cota (m).

5.1.1.1 Bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí

Os valores de vazão, profundidade média e velocidade média calculados para a seção fluviométrica da bacia Cancela-Tamandaí, correspondentes a cada uma das campanhas realizadas, podem ser vistos na tabela 9. Estes valores foram calculados utilizando as respectivas curvas-chave apresentadas nos itens 4.2 e 5.1.1. Os maiores valores de vazão, profundidade e velocidade média ocorreram durante a campanha do dia 26/02/2015, sendo de 0,33 m³/s, 0,33 m e 0,28 m/s, respectivamente; enquanto os menores valores ocorreram na campanha do dia 08/12/2014, ficando em 0,09 m³/s, 0,13 m e 0,21 m/s, respectivamente.

Tabela 9 - Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia Cancela-Tamandaí

Data da campanha	Q (m ³ /s)	P (m)	v (m/s)
04/11/2014	0,19	0,23	0,25
08/12/2014	0,09	0,13	0,21
03/02/2015	0,14	0,19	0,23
26/02/2015	0,33	0,33	0,28
18/03/2015	0,13	0,18	0,23
10/07/2015	0,15	0,20	0,24
23/10/2015	0,21	0,25	0,25

Legenda: Q – vazão; P - profundidade média; v - velocidade média.

5.1.1.2 Bacia hidrográfica Menino Deus II

A tabela 10 apresenta os dados das características hidrodinâmicas para a seção fluviométrica da bacia hidrográfica Menino Deus II. O maior valor obtido para a vazão,

profundidade média e velocidade média ocorreram durante a campanha do dia 12/01/2015, sendo de 0,94 m³/s, 0,40 m e 1,15 m/s, respectivamente; e os menores foram no dia 15/05/2015 ficando em 0,06 m³/s, 0,10 m e 0,31 m/s, respectivamente.

Tabela 10 - Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia Menino Deus II

Data da campanha	Q (m³/s)	P (m)	v (m/s)
17/12/2014	0,48	0,29	0,84
12/01/2015	0,94	0,40	1,15
04/02/2015	0,56	0,31	0,89
12/02/2015	0,49	0,29	0,84
12/03/2015	0,42	0,27	0,78
20/03/2015	0,15	0,16	0,48
10/04/2015	0,46	0,28	0,81
24/04/2015	0,44	0,27	0,80
15/05/2015	0,06	0,10	0,31
01/07/2015	0,15	0,16	0,48
15/07/2015	0,45	0,28	0,81
06/08/2015	0,16	0,16	0,49
02/09/2015	0,07	0,11	0,34

Legenda: Q – vazão; P - profundidade média; v - velocidade média.

5.1.1.3 Bacia hidrográfica Menino Deus IV

Na tabela 11 têm-se as características hidrodinâmicas das campanhas realizadas na seção fluviométrica da bacia hidrográfica Menino Deus IV. Observam-se os maiores valores das características monitoradas, vazão, profundidade e velocidade média, para o dia 15/07/2015, sendo de 1,19 m³/s, 0,25 m e 0,68 m/s, respectivamente. O menor valor de vazão foi de 0,04 m³/s, nas campanhas 12/03/2015 e 20/03/2015. Já para a profundidade média o menor valor ocorreu no dia 12/03/2015 e 26/05/2015 ficando em 0,08 m, enquanto que para a velocidade média foi no dia 12/02/2015, sendo 0,11 m/s.

Tabela 11 - Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia Menino Deus IV

(continua)			
Data da campanha	Q (m³/s)	P (m)	v (m/s)
17/12/2014	0,05	0,14	0,24
12/01/2015	0,61	0,18	0,31

Tabela 11 - Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia Menino Deus IV

				(conclusão)
Data da campanha	Q (m³/s)	P (m)	v (m/s)	
04/02/2015	0,30	0,14	0,36	
12/02/2015	0,06	0,12	0,11	
12/03/2015	0,04	0,08	0,20	
20/03/2015	0,04	0,09	0,21	
10/04/2015	0,18	0,17	0,19	
24/04/2015	0,21	0,17	0,20	
26/05/2015	0,07	0,08	0,18	
19/06/2015	0,66	0,18	0,31	
15/07/2015	1,19	0,25	0,68	
06/08/2015	0,26	0,16	0,27	
02/09/2015	0,10	0,09	0,17	

Legenda: Q – vazão; P - profundidade média; v - velocidade média.

5.1.1.4 Bacia hidrográfica João Goulart

A tabela 12 apresenta a vazão, a profundidade média e a velocidade média correspondente às campanhas realizadas na seção fluviométrica da bacia João Goulart. Observa-se que os maiores valores dessas características no período de estudo foram de 2,48 m³/s para a vazão, de 0,64 m para a profundidade média, e 0,70 m/s para a velocidade média, no dia 16/07/2015. O menor valor de vazão foi 0,01 m³/s nas campanhas realizadas em 18/12/2014 e 12/08/2015. Para a profundidade e velocidade foram registrados os menores valores de 0,04 m e 0,03 m/s, respectivamente, na campanha do dia 12/08/2015.

Tabela 12 - Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia João Goulart

				(continua)
Data da campanha	Q (m³/s)	P (m)	v (m/s)	
18/12/2014	0,01	0,05	0,04	
07/01/2015	0,44	0,29	0,28	
13/01/2015	0,96	0,41	0,42	
05/02/2015	0,19	0,19	0,18	
03/03/2015	0,28	0,23	0,22	
17/03/2015	0,46	0,29	0,28	
31/03/2015	0,96	0,41	0,42	
07/04/2015	0,67	0,35	0,35	
14/04/2015	0,43	0,28	0,27	
23/04/2015	0,47	0,30	0,29	

Tabela 12 - Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia João Goulart

Data da campanha	Q (m³/s)	P (m)	(conclusão)
			v (m/s)
05/05/2015	0,35	0,26	0,24
14/05/2015	0,10	0,15	0,13
16/06/2015	0,50	0,31	0,30
16/07/2015	2,48	0,64	0,70
12/08/2015	0,01	0,04	0,03
15/09/2015	0,06	0,12	0,15

Legenda: Q – vazão; P - profundidade média; v - velocidade média.

5.1.1.5 Bacia hidrográfica RSC 287

A tabela 13 apresenta as características hidrodinâmicas obtidas na seção fluviométrica da bacia RSC 287, correspondentes às campanhas realizadas neste estudo e aos resultados obtidos por Ávila (2014). Os maiores valores dessas características neste estudo foram no dia 06/11/2015, sendo 17,10 m³/s, 2,75 m e 0,38 m/s, esta campanha foi realizada após um longo período chuvoso. Os menores valores foram nas campanhas 19/01/16 e 21/01/2016. Nessas campanhas não foi possível determinar as características hidrodinâmicas, uma vez que a vazão apresentava-se nula, a água estava represada e sem velocidade na seção fluviométrica. Observou-se visualmente que o volume de água neste dia foi o mais baixo de todos os dias monitorados. Devido á um longo período sem eventos de precipitações, havia irrigação de lavouras de arroz.

Estes valores diferem dos monitorados por Ávila (2014), que obteve valores de vazões menores que 1,00 m³/s. Observou-se uma grande variação nos valores das características hidrodinâmicas, mesmo considerando apenas o período monitorado neste estudo. Isto pode ser atribuído ao fato da área de contribuição desta bacia possuir lavouras com irrigação.

Tabela 13 - Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia RSC 287

Data da campanha	Q (m³/s)	P (m)	(continua)
			v (m/s)
26/07/2012*	0,53	0,86	0,06
05/09/2012*	0,35	0,74	0,04
19/04/2013*	0,34	0,82	0,04
19/08/2013*	0,55	0,84	0,05
30/09/2015	6,40	1,45	0,25
06/11/2015	17,10	2,75	0,38

Tabela 13 - Vazão, profundidade média e velocidade média na bacia RSC 287

Data da campanha	Q (m ³ /s)	P (m)	(conclusão)
			v (m/s)
07/12/2015	2,05	0,75	0,105
10/12/2015	3,64	1,24	0,105
19/01/2016	Nula	-	-
21/01/2016	Nula	-	-
01/02/2016	3,37	0,68	0,128

Legenda: * - Dados obtidos por Ávila (2014); Q – vazão; P - profundidade média; v - velocidade média; - - parâmetro não foi analisado.

5.1.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio

A tabela 14 apresenta os resultados das determinações de DBO realizadas nas seções fluviométricas das bacias hidrográficas. As bacias João Goulart e Cancela-Tamandaí possuem os maiores valores de DBO, devido a sua característica urbana, com maior lançamento de carga orgânica no rio. Já nas bacias Menino Deus II, Menino Deus IV e RSC 287, a concentração foi mais baixa, com um conteúdo orgânico biodegradável menor na água.

Tabela 14 - Resultados das determinações de DBO

Data da campanha	Bacia Hidrográfica	DBO (mg/L)
25/02/2015	Menino Deus II	2,0
12/03/2015	Menino Deus II	1,0
15/05/2015	Menino Deus II	3,0
15/07/2015	Menino Deus II	1,0
15/05/2015	Menino Deus IV	3,0
15/07/2015	Menino Deus IV	2,0
09/03/2015	João Goulart	33,0
14/05/2015	João Goulart	26,0
15/07/2015	João Goulart	5,0
23/10/2015	Cancela-Tamandaí	21,0
28/01/2016	RSC 287	1,5

A bacia João Goulart possui sua seção fluviométrica após o rio contornar um trecho da cidade de Santa Maria-RS, acumulando MO procedente dos lançamentos de esgoto urbano e resíduos sólidos. Os maiores valores de DBO (33 mg/L e 26 mg/L) ocorreram nas campanhas com vazões mais baixas. O menor valor de DBO (5 mg/L) foi observado na campanha com maior vazão, devido ao processo de diluição da carga orgânica.

A bacia Cancela-Tamandaí está totalmente inserida na área urbana de Santa Maria, com elevado lançamento de esgoto e resíduos sólidos pela drenagem urbana (Figura 29).

Nesta bacia foi realizado apenas uma campanha para caracterização da carga orgânica, que indicou uma concentração de DBO de 21 mg/L. É importante considerar que a amostra foi coletada em uma época chuvosa, com vazão elevada, e conseqüentemente com diluição da MO presente no meio. Assim, comparada com a bacia João Goulart (5 mg/L em época chuvosa), pode-se considerar que a bacia Cancela-Tamandaí possui maior aporte de MO. Esta elevada carga orgânica na bacia Cancela-Tamandaí também foi verificada por Santos (2014), que registrou valores variando de 45 a 378 mg/L, com uma média de 183 mg/L.

Figura 29 - Veiculação de resíduos sólidos pela drenagem urbana na bacia Cancela-Tamandaí



Fonte: A autora

Nas bacias Menino Deus II e IV as concentrações de DBO foram mais baixas. O uso e ocupação do solo (Figura 14 e 16) apresentou uma baixa presença de população urbana na área das bacias, acarretando em um menor lançamento de esgoto e resíduos sólidos. Na bacia Menino Deus II visualizou-se pontos de lançamento de esgoto, como mostra a figura 30, no entanto, o aporte de MO é pequeno.

Figura 30 - Lançamento de matéria orgânica na Bacia Menino Deus II



Fonte: A autora

5.2 COEFICIENTE DE REAERAÇÃO (k_2)

O k_2 foi determinado de forma experimental aplicando-se o Método Delta Aproximado, conforme os perfis de OD (Apêndices A, B, C, D e E) e os dados do fotoperíodo (Apêndice F). A seguir, discute-se a viabilidade do método, as variações do k_2 e os parâmetros oxigênio dissolvido médio ($OD_{\text{médio}}$), temperatura média ($T_{\text{média}}$), concentração de saturação de oxigênio dissolvido na altitude (C_s) e o déficit de oxigênio dissolvido (DOD) observados nas seções fluviométricas das bacias hidrográficas.

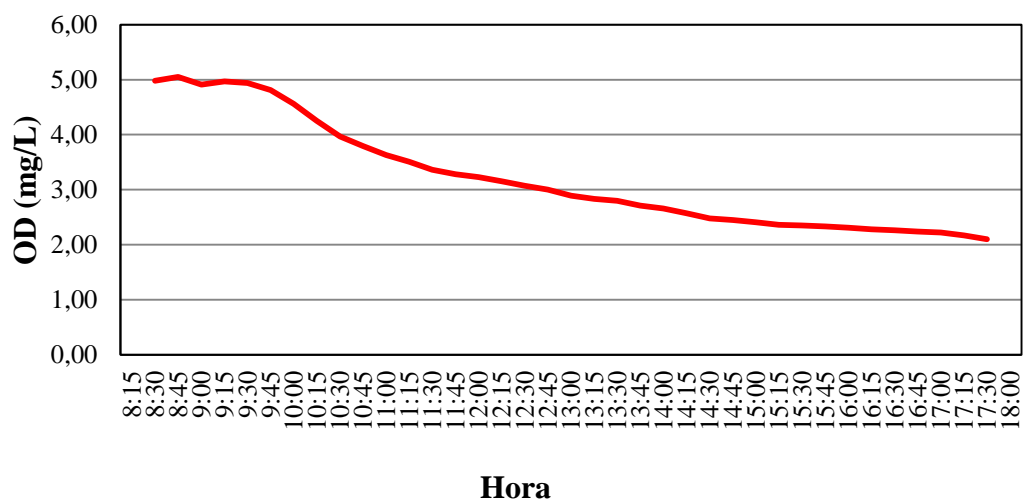
5.2.1 Bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí

A concentração de OD apresentou uma elevada variação durante o fotoperíodo, como pode ser observado no perfil de OD monitorado no dia 04/11/2014 (Figura 31). Cabe destacar que um único perfil de OD monitorado na seção fluviométrica dessa bacia, no dia 18/03/2015, a concentração não variou muito devido a aproximar-se de 0 mg/L.

Na seção fluviométrica dessa bacia não foi possível determinar o k_2 utilizando o Método Delta Aproximado em nenhuma das sete tentativas realizadas. O perfil de OD não satisfaz o que foi proposto por McBride e Chapra (2005) na figura 4 (c), não ocorrendo a

formação do perfil de OD adequado para aplicação do método, como se observa na figura 31. Comportamentos semelhantes foram encontrados nos demais perfis monitorados, conforme o apêndice A.

Figura 31 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 04/11/2014



A tabela 15 apresenta os valores de vazão, $OD_{\text{médio}}$, $T_{\text{média}}$, C_s , e DOD para cada dia de monitoramento. Como discutido no item 5.1.2, a bacia possui indícios de um elevado acúmulo e lançamento de carga orgânica. O que implica em uma elevada demanda de oxigênio para decomposição da MO, ocasionando apenas um decréscimo da concentração de OD e um considerável DOD.

Tabela 15 - Valores de Q , k_2 , $OD_{\text{médio}}$, $T_{\text{média}}$, C_s e DOD na bacia Cancela-Tamandaí

Data da campanha	Q (m^3/s)	k_2 (d^{-1})	$OD_{\text{médio}}$ (mg/L)	$T_{\text{média}}$ ($^{\circ}C$)	C_s (mg/L)	DOD (mg/L)
04/11/2014	0,188	SP	3,21	19,84	8,96	5,75
08/12/2014	0,087	SP	0,70	23,72	8,30	7,60
03/02/2015	0,140	SP	1,50	23,49	8,34	6,84
26/02/2015	0,326	SP	4,39	22,96	8,42	4,03
18/03/2015	0,131	SP	0,23	22,82	8,44	8,21
10/07/2015	0,149	SP	2,20	15,76	9,77	7,57
23/10/2015	0,207	SP	4,24	17,73	9,37	5,13

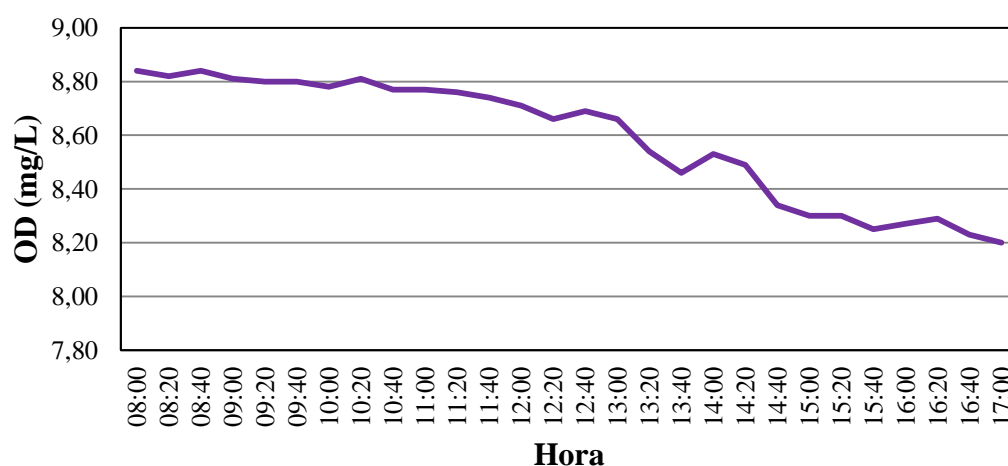
Legenda: SP – sem perfil de OD adequado

A aplicação do Método Delta Aproximado para a seção fluviométrica da bacia Cancela-Tamandaí não foi satisfatória e viável, em razão da ausência do perfil de OD adequado, proposto por McBride e Chapra (2005) na figura 4 (c), uma vez que não é possível obter o valor de Φ para calcular o k_2 . A inviabilidade de aplicação do Método Delta Aproximado na seção fluviométrica dessa bacia pode ser atribuída ao lançamento de esgotos domésticos na seção monitorada, o que altera a curva do perfil. Este resultado corrobora com as conclusões obtidas por Ávila (2014).

5.2.2 Bacia hidrográfica Menino Deus II

As concentrações de OD no perfil não variaram muito na seção fluviométrica da bacia Menino Deus II, ao longo do fotoperíodo, em oito das 13 campanhas realizadas. Um exemplo do perfil obtido pode ser observado na figura 32. As exceções ocorreram nas campanhas dos dias 20/03/2015, 10/04/2015, 24/04/2015, 06/08/2015 e 02/09/2015, que apresentaram maiores variações nas concentrações de OD. A baixa variação ocorreu devido à concentração de OD no rio estar próximo da C_s e apresentar um baixo DOD. Por ser uma bacia com valores de DBO baixos, conforme o item 5.1.2, há pouca demanda de oxigênio para decomposição da carga orgânica.

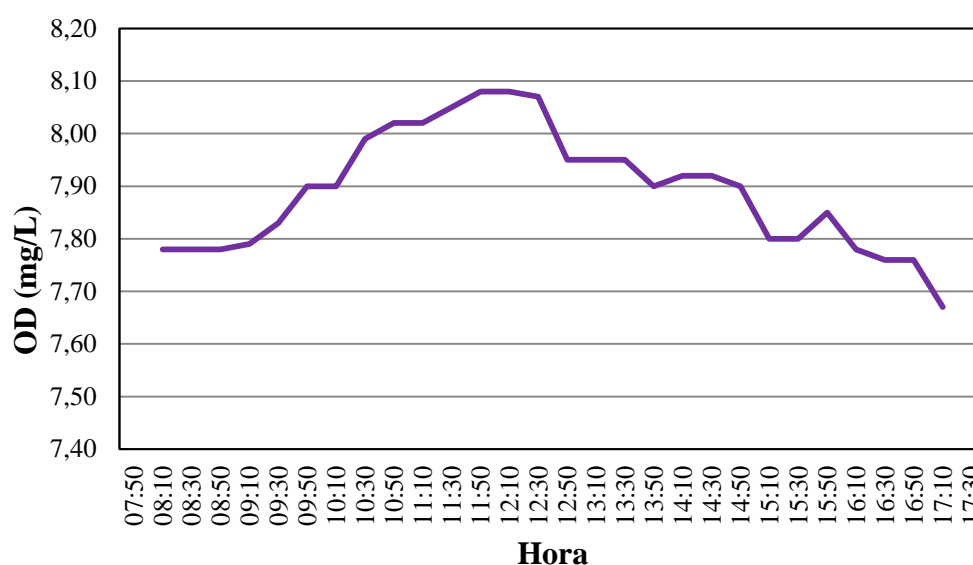
Figura 32 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 15/05/2015



A condição climática do RS promove temperaturas baixas no inverno e altas no verão. Os monitoramentos de perfis de OD ocorreram durante todo o ano, no qual se observou que

em temperaturas mais baixas o perfil de OD não correspondia ao necessário para aplicação do método (Figura 32), enquanto que em temperaturas mais elevadas os perfis de OD (Figura 33) se demonstraram mais semelhantes ao proposto por McBride e Chapra (2005). A carência de fotossíntese em temperaturas baixas influenciou na deficiência de elevação de OD, devido à baixa presença de fitoplâncton nessa época do ano. A baixa temperatura durante o inverno pode reduzir a capacidade de reprodução e abundância do fitoplâncton e diminuir os processos biológicos, comparada com as outras estações do ano (LONG et al., 2013). Sendo assim, a temperatura pode ter sido um dos fatores que influenciaram na inviabilidade de utilização do método, uma vez que as temperaturas mais elevadas são semelhantes à condição climática do Rio Grand, apresentada na tabela 2, onde o Método Delta foi aplicado por Chapra e Di Toro (1991).

Figura 33 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 12/02/2015.



Na tabela 16, além da temperatura ($T_{\text{média}}$), também podem ser vistos os valores de Q , k_2 , $OD_{\text{médio}}$, C_s e DOD . Apenas nas campanhas 17/12/2014, 04/02/2015 e 12/02/2015 foi possível determinar o k_2 , devido a essas campanhas apresentarem o perfil de OD proposto por McBride e Chapra (2005), conforme a figura 33. As campanhas dos dias 12/01/2015 e 12/02/2015 apresentaram o perfil de OD adequado, no entanto o mínimo DOD ocorreu antes do meio-dia solar, impossibilitando a aplicação do método.

Tabela 16 - Valores de Q, k_2 , $OD_{\text{médio}}$, $T_{\text{média}}$, C_s e DOD na bacia Menino Deus II

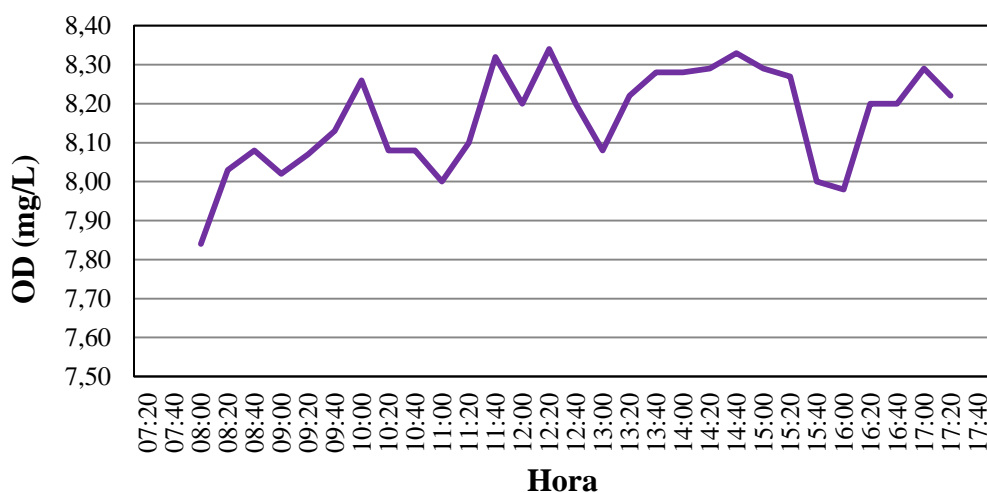
Data da campanha	Q (m ³ /s)	k_2 (d ⁻¹)	$OD_{\text{médio}}$ (mg/L)	$T_{\text{média}}$ (°C)	C_s (mg/L)	DOD (mg/L)
17/12/2014	0,48	32,4	7,47	19,92	8,90	1,43
12/01/2015	0,94	MD	7,50	21,60	8,61	1,11
04/02/2015	0,56	49,3	7,46	22,57	8,44	0,98
12/02/2015	0,49	MD	7,89	21,64	8,60	0,71
12/03/2015	0,42	SP	8,16	21,14	8,69	0,53
20/03/2015	0,15	SP	6,65	21,99	8,54	1,89
10/04/2015	0,46	SP	7,56	18,92	9,09	1,53
24/04/2015	0,44	SP	7,60	18,16	9,23	1,63
15/05/2015	0,06	SP	8,59	17,17	9,43	0,84
01/07/2015	0,15	SP	9,17	14,40	10,02	0,85
15/07/2015	0,45	SP	9,48	14,13	10,08	0,60
06/08/2015	0,16	SP	8,30	17,90	9,28	0,98
02/09/2015	0,07	SP	8,33	15,03	9,88	1,55

Legenda: MD – mínimo DOD antes do meio-dia solar; SP – sem perfil de OD adequado.

As campanhas 24/04/2015, 10/04/2015, 20/03/2015 e 12/03/2015, todos em período de temperatura mais elevada, não apresentaram o perfil de OD adequado. Isto pode ser observado na figura 34, que corresponde à campanha do dia 12/03/15. Não foi possível diagnosticar a principal causa da impossibilidade de obtenção do perfil de OD adequado com os parâmetros analisados nesse estudo. O apêndice B mostra os demais perfis de OD monitorados na seção fluviométrica da bacia Menino Deus II.

Na seção fluviométrica da bacia Menino Deus II encontrou-se diferentes situações quanto à obtenção do perfil de OD. De modo geral, o Método Delta Aproximado não foi viável para determinar o k_2 na seção fluviométrica dessa bacia, pela ausência do perfil de OD adequado. Não foi possível associar a inviabilidade de aplicação do método a uma característica específica da bacia, das condições das campanhas, da seção fluviométrica ou dos rios, exceto para as campanhas com temperaturas baixas.

Figura 34 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 12/03/2015



5.2.3 Bacia hidrográfica Menino Deus IV

Na seção fluviométrica da bacia Menino Deus IV observou-se uma baixa variação de OD em grande parte dos monitoramentos dos perfis de OD. De modo geral, foi possível obter o perfil de OD adequado sem dificuldades. No entanto, os perfis monitorados em dias com temperaturas baixas (Tabela 17) não foram satisfatórios conforme o perfil proposto pelo Método Delta Aproximado. Na campanha do dia 19/06/2015 ocorreu a menor $T_{\text{média}}$ da água (Tabela 17) e, como pode ser observado na figura 35, a concentração de OD manteve-se praticamente estável antes do declínio.

Em campanhas com temperaturas altas, como exemplo o dia 04/02/2015, são observadas curvas no perfil de OD mais definidas, como o perfil apresentado na figura 36. Nos demais perfis de OD (Apêndice C) obteve-se comportamentos semelhantes aos apresentados.

Tabela 17 - Valores de Q, k_2 , $OD_{\text{médio}}$, $T_{\text{média}}$, C_s e DOD na bacia Menino Deus IV

Data da campanha	Q (m ³ /s)	k_2 (d ⁻¹)	$OD_{\text{médio}}$ (mg/L)	$T_{\text{média}}$ (°C)	C_s (mg/L)	DOD (mg/L)
17/12/2014	0,05	33,6	6,94	21,07	8,70	1,76
12/01/2015	0,61	MD	7,56	23,20	8,34	0,78
04/02/2015	0,30	MD	7,23	24,70	8,10	0,87
12/02/2015	0,06	MD	7,45	23,80	8,24	0,79
12/03/2015	0,04	MD	7,62	23,01	8,37	0,75
20/03/2015	0,04	MD	6,12	23,90	8,23	2,11
10/04/2015	0,18	MD	7,37	19,80	8,93	1,56
24/04/2015	0,21	SP	7,63	18,63	9,14	1,51
26/05/2015	0,07	174,3	7,90	17,50	9,36	1,46
19/06/2015	0,66	MD	10,04	11,40	10,74	0,70
15/07/2015	1,19	MD	9,58	13,88	10,14	0,56
06/08/2015	0,26	MD	8,24	18,70	9,13	0,89
02/09/2015	0,10	MD	8,33	16,20	9,63	1,30

Legenda: MD – mínimo DOD antes do meio-dia solar; SP – sem perfil de OD adequado.

Figura 35 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 19/06/2015

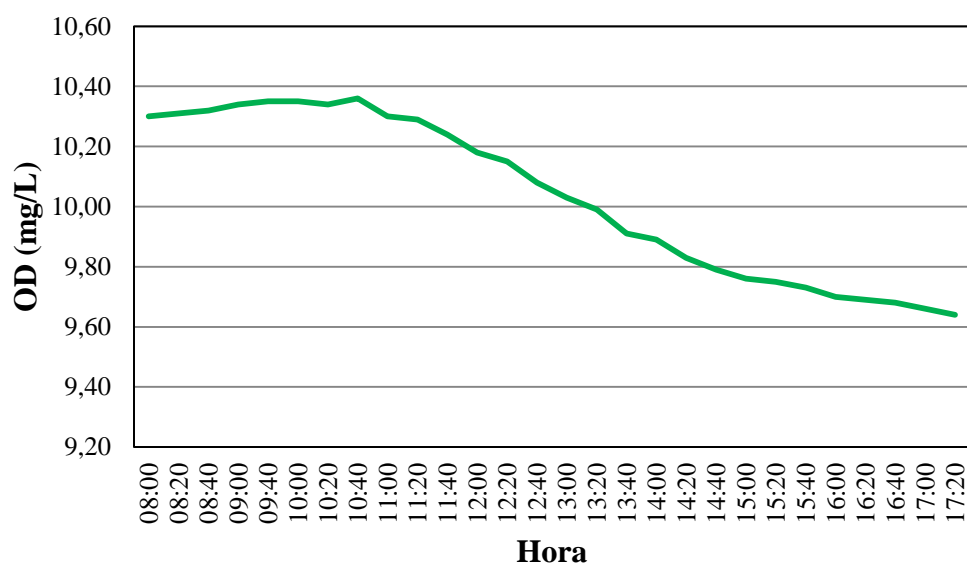
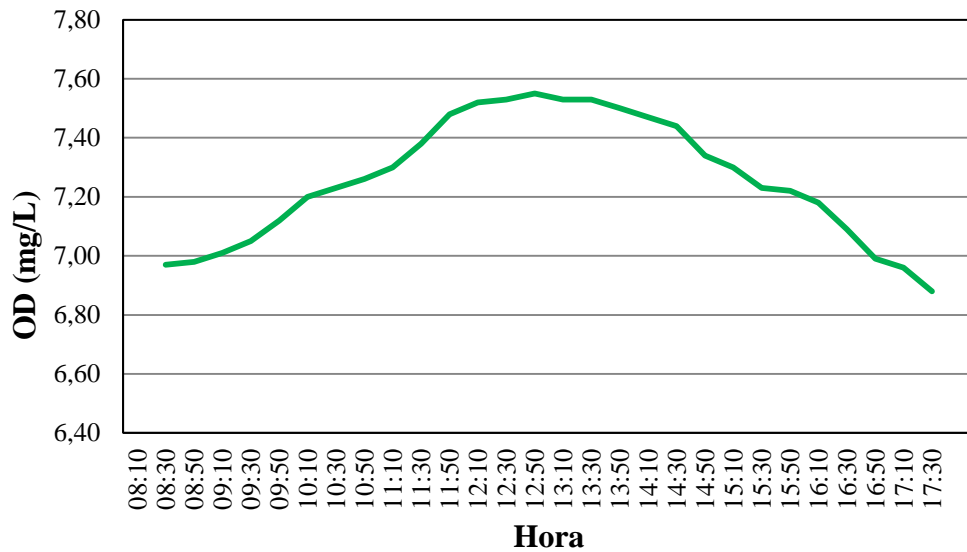


Figura 36 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 04/02/2015



A determinação do k_2 por meio do Método Delta Aproximado não foi possível na maioria das campanhas (Tabela 17) na seção fluviométrica dessa bacia. Principalmente devido ao mínimo DOD ocorrer antes do meio-dia solar, impossibilitando a obtenção da variável Φ . Como se observa na campanha do dia 04/02/2015 (Figura 36), em que o mínimo DOD ocorreu às 12h50min e o meio-dia solar às 13h48min.

Outro ponto que contribuiu para a inviabilidade de aplicação do método na seção fluviométrica dessa bacia foi a sensibilidade a baixos Φ . A campanha do dia 26/05/2015 apresentou um pequeno Φ , aproximadamente 0,127 horas, ocasionando uma superestimação do k_2 , com um valor de $174,3 \text{ d}^{-1}$. Pelo fato do mínimo DOD ocorrer antes do meio-dia solar ou muito próximo do mesmo, possivelmente deve haver uma elevada reaeração na seção fluviométrica dessa bacia. Chapra (1997) afirma que o Método Delta possui deficiência em sistemas com alta reaeração, por ser sensível a baixos Φ .

Portanto, o Método Delta Aproximado não foi viável na seção fluviométrica da bacia Menino Deus IV. A inviabilidade do método se deu por dois motivos: i) o mínimo DOD do perfil diário apresentou-se antes do meio-dia solar; ii) superestimação do valor do k_2 em pequenos Φ .

5.2.4 Bacia hidrográfica João Goulart

Na seção fluviométrica da bacia hidrográfica João Goulart na maioria das campanhas houve uma elevada variação de OD durante o fotoperíodo. Possivelmente, devido à presença de MO na seção fluviométrica, como se observou no item 5.1.2, havendo valores elevados de DBO.

Os perfis de OD coletados na seção fluviométrica dessa bacia apresentaram-se coerentes com o proposto por McBride e Chapra (2005) na figura 4 (c), com exceção da campanha do dia 16/07/2015 (Figura 37) que não apresentou o perfil de OD adequado. Nessa campanha os valores de vazão e OD estavam altos e o DOD baixo (Tabela 18), comparados com as outras campanhas. Assim, houve dificuldade no aumento da concentração de OD no perfil, devido à concentração estar próximo a C_s .

A presença de temperaturas baixas não prejudicou a obtenção do perfil de OD adequado. A campanha do dia 16/06/2015 (Figura 38) foi o que apresentou menor $T_{média}$, mesmo assim a curva do perfil de OD mostrou-se satisfatória. Os demais perfis dessa bacia são apresentados no Apêndice D.

Figura 37 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 16/07/2015

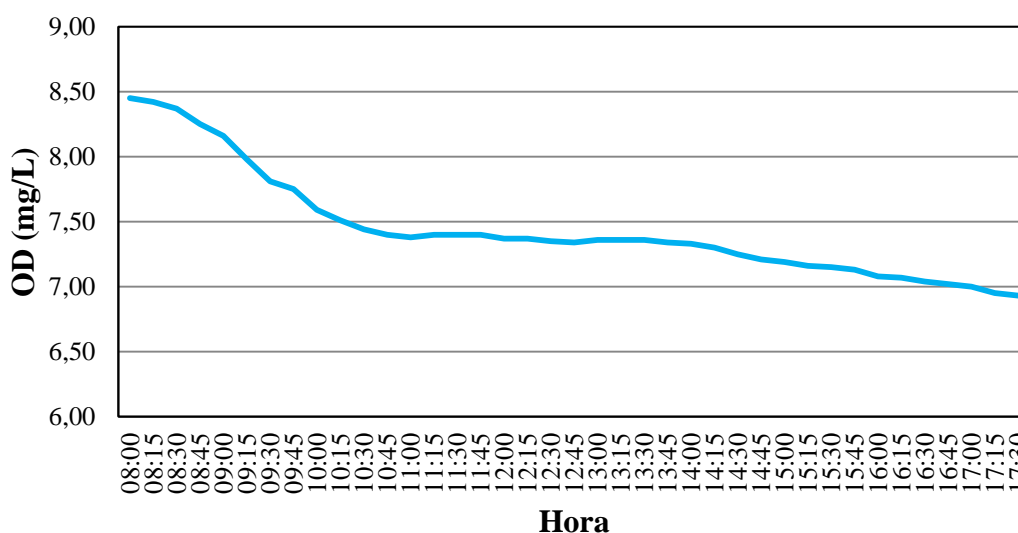
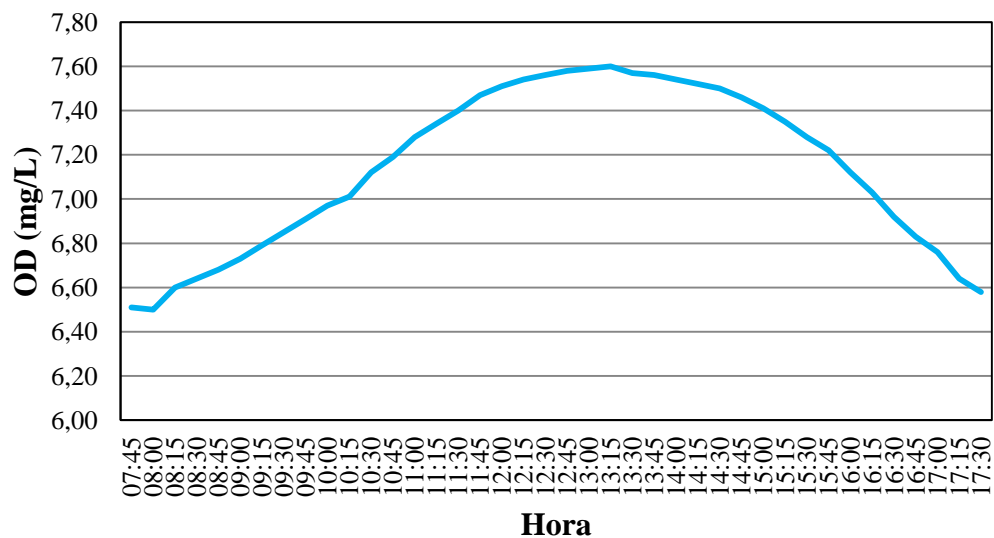


Tabela 18 - Valores de Q , k_2 , $OD_{\text{médio}}$, $T_{\text{média}}$, C_s e DOD na bacia João Goulart

Data da campanha	Q (m^3/s)	k_2 (d^{-1})	$OD_{\text{médio}}$ (mg/L)	$T_{\text{média}}$ ($^{\circ}C$)	C_s (mg/L)	DOD (mg/L)
18/12/2014	0,01	16,9	3,95	23,8	8,28	4,33
07/01/2015	0,44	25,8	2,70	24,9	8,10	5,40
13/01/2015	0,96	68,4	4,46	29,2	7,47	3,01
05/02/2015	0,19	8,4	2,65	25,6	7,99	5,34
03/03/2015	0,28	20,4	3,66	25,1	8,08	4,42
17/03/2015	0,46	7,4	3,22	24,7	8,13	4,91
31/03/2015	0,96	5,7	3,95	21,6	8,65	4,70
07/04/2015	0,67	7,9	5,01	19,0	9,10	4,09
14/04/2015	0,43	11,1	3,88	21,1	8,72	4,84
23/04/2015	0,47	26,4	6,44	19,9	8,94	2,50
05/05/2015	0,35	34,9	5,33	14,9	9,94	4,61
14/05/2015	0,10	24,3	3,52	17,3	9,44	5,92
16/06/2015	0,50	38,1	7,14	12,8	10,43	3,29
16/07/2015	2,48	SP	7,45	14,3	10,08	2,63
12/08/2015	0,01	42,6	3,21	20,0	8,92	5,71
15/09/2015	0,06	25,0	4,55	17,1	9,47	4,92

Legenda: SP – sem perfil de OD adequado.

Figura 38 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 16/06/2015



Com a obtenção da curva no perfil de OD, foi possível a determinação do k_2 pelo Método Delta Aproximado na seção fluviométrica dessa bacia hidrográfica. Os valores do k_2

foram muito variáveis, estando entre 5,7 e 68,4 d⁻¹. Em um estudo sobre modelos de determinação do k_2 , Omole et al. (2013) também obteve valores do k_2 muito variáveis.

Na campanha do dia 13/01/2015 ocorreu uma superestimação no valor do k_2 . O valor do coeficiente foi muito elevado comparado com os valores das outras campanhas. Isso se deve ao método ser sensível a baixos Φ .

Na tabela 19 é apresentada a influência do reservatório da CORSAN na bacia João Goulart, indicando a presença/ausência de contribuição na área de drenagem da bacia. Há presença de contribuição do reservatório na maioria das campanhas. As campanhas com contribuição apresentaram os maiores valores do k_2 , conseqüentemente com valores altos de vazão. No entanto, as campanhas 07/04/2015 e 14/04/2015 tiveram contribuição, mas apresentaram valores de k_2 baixos.

Possivelmente a vazão do dia 31/03/2015 possui um equívoco em seu valor, podendo ter ocorrido um registro de cota incorreto pelo equipamento Thalimedes. Observa-se que tal vazão não se apresentou coerente com o valor do k_2 (Tabela 18), ou seja, apresentou uma vazão alta e um k_2 baixo, sendo que não havia contribuição do reservatório (Tabela 19) para esse aumento de vazão.

Tabela 19 - Contribuição do reservatório da CORSAN nas campanhas da bacia João Goulart

Data da campanha	Contribuição do reservatório da CORSAN
18/12/2014	Ausência
07/01/2015	Presença
13/01/2015	Presença
05/02/2015	Ausência
03/03/2015	Ausência
17/03/2015	Ausência
31/03/2015	Ausência
07/04/2015	Presença
14/04/2015	Presença
23/04/2015	Presença
05/05/2015	Presença
14/05/2015	Ausência
16/06/2015	Presença
16/07/2015	Presença
12/08/2015	Presença
15/09/2015	Ausência

Assim, constatou-se que a aplicação do Método Delta Aproximado foi viável na seção fluviométrica dessa bacia hidrográfica, porém possui as seguintes limitações de aplicabilidade: i) não pode haver um grande aumento da vazão, sendo viável para vazões inferiores a $1 \text{ m}^3/\text{s}$; ii) haver presença regular de carga orgânica na seção; iii) os valores de Φ não devem ser muito baixos.

5.2.5 Bacia hidrográfica RSC 287

A seção fluviométrica da bacia hidrográfica RSC 287 apresentou na maioria dos perfis de OD, concentrações de OD com variações pequenas (ex. Figura 41), no entanto nas campanhas com vazões altas houve variações maiores (ex. Figura 40).

Nas campanhas dos dias 30/09/2015 e 06/11/2015 houve ausência do perfil de OD adequado. Observa-se que essas campanhas apresentaram as maiores vazões na seção fluviométrica dessa bacia. Na campanha 30/09/2015 (Figura 39), observa-se que a concentração de OD teve uma tendência a aumentar aproximadamente às 09h30min, havendo uma vazão razoavelmente alta ($6,40 \text{ m}^3/\text{s}$) nesse dia. Já na figura 40, campanha 06/11/2015, que possui uma vazão extremamente alta ($17,10 \text{ m}^3/\text{s}$), em nenhum momento a concentração de OD aumentou, havendo apenas o decréscimo. Este comportamento indica que o valor da vazão foi um fator limitante para a aplicação do método, havendo limites de vazões para aplicação, como observado também na seção fluviométrica da bacia João Goulart.

Figura 39 - Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 30/09/2015

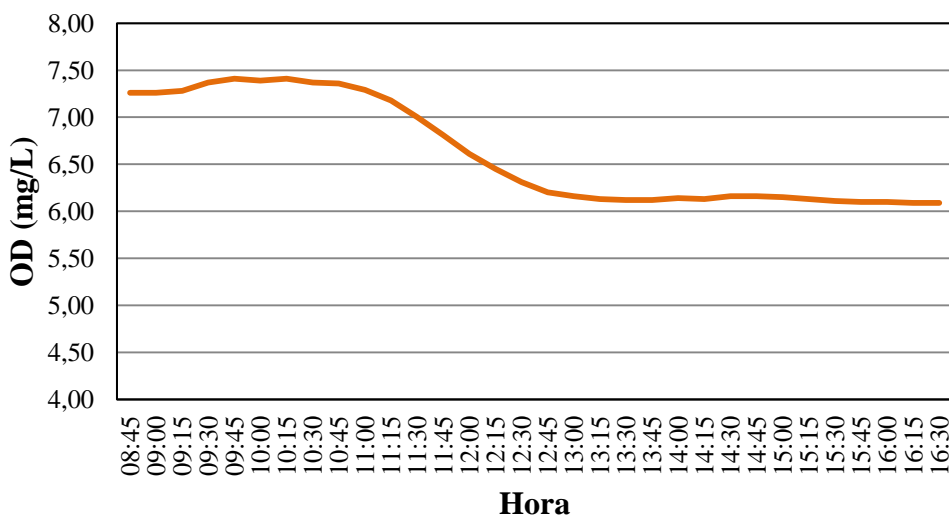
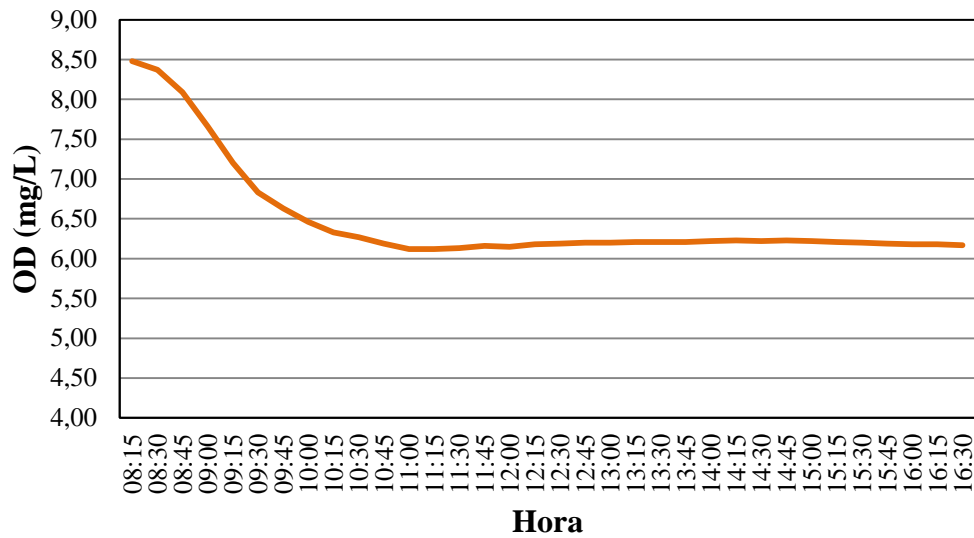
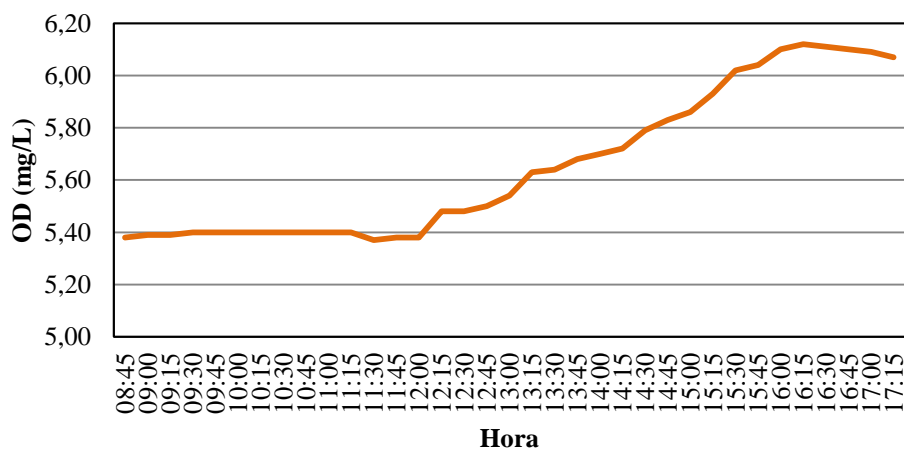


Figura 40 - Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 06/11/2015



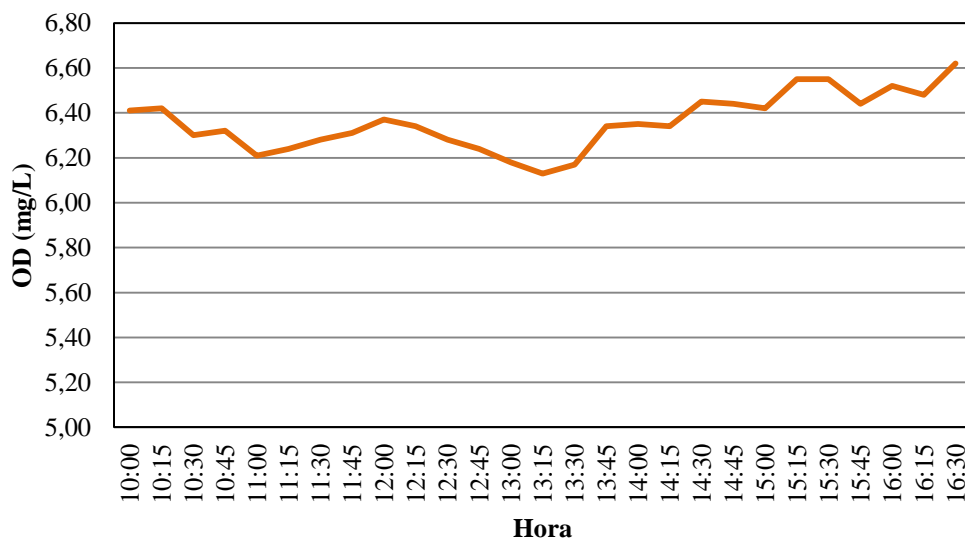
No perfil da campanha do dia 01/02/2016 (Figura 41) o OD iniciou constante, e após um determinado tempo passou a subir até ao mínimo DOD. Isto pode ser atribuído ao fato de que em rios com pequenos k_2 há um retardamento da taxa de transferência de reaeração, permitindo que o efeito do dia anterior transite no dia atual, devido à decadência durante a noite ser lenta e não concluída até ao amanhecer. Assim, no início do fotoperíodo ocorre o decaimento até que a fonte seja suficiente para iniciar um perfil novamente com o aumento da concentração de OD (CHAPRA e DI TORO, 1991).

Figura 41 - Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 01/02/2016



No mês de janeiro/2016 foi difícil de obter o perfil de OD adequado. Com a ausência de precipitações e tempo seco, os agricultores passaram a irrigar as lavouras com a água do Rio Vacacaí-Mirim. Na campanha do dia 19/01/2016 houve captação de água próximo da seção fluviométrica (Figura 25), no período das 12h00min até 16h00min. Na figura 42 se observa que não houve um perfil de OD adequado. No horário em que houve a captação de água a concentração de OD se elevou, devido à turbulência na água, descaracterizando a condição natural do rio e impossibilitando a determinação de um perfil de OD confiável. Nas campanhas dos dias 21/01/2016 e 01/02/2016 não ocorreram captações de água para a irrigação, possibilitando a obtenção de um perfil de OD adequado. Os demais perfis dessa bacia são apresentados no Apêndice E.

Figura 42 - Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 19/01/2016



De modo geral, a aplicação do Método Delta Aproximado foi viável na seção fluviométrica da bacia RSC 287 quando as condições naturais estavam estabelecidas na seção fluviométrica. A tabela 20 mostra os valores de vazão, k_2 , $OD_{médio}$, $T_{média}$, C_s e DOD determinados na seção fluviométrica dessa bacia, acrescida dos resultados obtidos por Ávila (2014) nesta mesma seção. As condições hidrodinâmicas na seção durante o monitoramento feito por Ávila (2014) diferem das condições atuais, caracterizando vazões menores. No entanto, em ambas as situações foram obtidos valores do k_2 relativamente próximos. Neste estudo foram obtidos valores do k_2 variando de 8,4 a $13,75 d^{-1}$, caracterizando uma variação pequena do coeficiente.

Tabela 20 - Valores de Q, k_2 , $OD_{médio}$, $T_{média}$, C_s e DOD na bacia RSC 287

Data da campanha	Q (m ³ /s)	k_2 (d ⁻¹)	$OD_{médio}$ (mg/L)	$T_{média}$ (°C)	C_s (mg/L)	DOD (mg/L)
26/07/2012*	0,53	15,92	6,23	-	-	-
05/09/2012*	0,35	13,53	5,22	-	-	-
19/04/2013*	0,34	11,15	4,40	-	-	-
19/08/2013*	0,55	22,23	6,40	-	-	-
30/09/2015	6,40	SP	6,62	17,38	9,46	2,84
06/11/2015	17,10	SP	6,50	16,26	9,69	3,19
07/12/2015	2,05	11,01	5,05	21,67	8,65	3,60
10/12/2015	3,64	9,47	6,57	22,03	8,60	2,03
19/01/2016	Nula	SP	6,36	21,56	8,68	2,32
21/01/2016	Nula	13,75	6,07	25,95	7,97	1,90
01/02/2016	3,37	8,40	5,64	24,01	8,27	2,63

Legenda: * - Dados obtidos por Ávila (2014); SP – sem perfil de OD adequado; - - parâmetro não foi analisado.

A tabela 21 apresenta a contribuição do reservatório na bacia RSC 287. Observa-se que no período chuvoso (novembro/dezembro de 2015) ocorreu contribuição do reservatório na bacia, havendo vazões mais elevadas.

Tabela 21 - Contribuição do reservatório da CORSAN nas campanhas da bacia RSC 287

Data da campanha	Contribuição do reservatório da CORSAN
30/09/2015	Presença
06/11/2015	Presença
07/12/2015	Presença
10/12/2015	Presença
19/01/2016	Ausência
21/01/2016	Ausência
01/02/2016	Ausência

Contudo, foi possível aplicar o Método Delta Aproximado na seção fluviométrica da bacia RSC 287, com exceção das campanhas que apresentaram vazões superiores a 3,64 m³/s e épocas com irrigação agrícola.

5.2.6 Viabilidade da aplicação do Método Delta Aproximado na determinação do k_2

Segundo McBride e Chapra (2005) o Método Delta Aproximado apresenta algumas limitações de aplicabilidade: i) o método é particularmente eficaz para fluxos com taxas de reaeração baixas, em rios altamente aerados deve-se usar o método com cautela; ii) a determinação do k_2 é sensível para Φ baixos, podendo acarretar em erros nos valores.

O ano de 2015, em que houve o maior número de campanhas, apresentou condições meteorológicas atípicas. As precipitações ficaram acima da média, comparando-se aos anos anteriores, o que pode ter influenciado na viabilidade do Método Delta Aproximado.

De modo geral, levando-se em consideração as campanhas realizadas neste estudo, a aplicação do Método Delta Aproximado apresentou limitações, sendo algumas as referidas por McBride e Chapra (2005). As limitações de aplicabilidade observadas neste estudo foram as seguintes:

- i) A elevada presença de carga orgânica, oriunda do lançamento de esgotos domésticos, inviabilizou o método quanto à obtenção do perfil de OD adequado. O aumento da concentração de OD na curva do perfil foi prejudicado, devido ao lançamento frequente de esgoto durante o período da manhã. Impossibilitando a obtenção da variável Φ ;
- ii) A presença de temperaturas baixas interferiu no aumento da concentração de OD no início do fotoperíodo. A carência da fotossíntese, ocasionada pela ausência da reprodução e abundância do fitoplâncton, prejudica a produção de OD. O que prejudicou a aquisição do perfil de OD adequado, impossibilitando a obtenção da variável Φ ;
- iii) Em rios com elevadas taxas de reaeração, o mínimo DOD ocorreu antes do meio-dia solar. E apresentou valores de Φ pequenos, provocando uma superestimação nos valores do k_2 , como afirma McBride e Chapra (2005);
- iv) A característica hidrodinâmica - vazão apresentou limites para a aplicação do método, devido a alterar a condição de estado da água. A concentração de OD ficou muito próxima da C_s , dificultando seu aumento na curva.
- v) O conteúdo orgânico presente na seção do rio deve ser regular, não muito elevado e nem muito baixo. Em campanhas em que houve baixa presença de MO, o método não foi viável, devido à dificuldade de aumento da concentração de OD, ocasionado pela proximidade da concentração de OD com a C_s . Quando em alta presença de MO também não foi viável a aplicação

do método, devido ao alto consumo de OD a sua concentração não aumentou durante o início do fotoperíodo;

- vi) A presença de captação de água para irrigação influenciou nas condições do rio, interferindo o sistema natural de equilíbrio, o que torna o perfil de OD não confiável.

5.2.7 Influência das características hidrodinâmicas na determinação do k_2

Como mencionado no item 3.5 o Rio Grand, onde foi aplicado o Método Delta, é um rio grande, com vazão de $8,35 \text{ m}^3/\text{s}$ e profundidade de $0,58 \text{ m}$, e o valor do k_2 observado foi de $5,5 \text{ d}^{-1}$. Dessa forma, compreende-se que rios com vazões e profundidades altas, apresentam coeficientes baixos. Pode-se afirmar que as características hidrodinâmicas citadas nesse parágrafo, apresentam-se como condições ótimas para a aplicação do método. Tais características são semelhantes às encontradas na seção fluviométrica da bacia RSC 287, e diferem-se consideravelmente das demais seções fluviométricas das bacias estudadas.

Neste estudo, de um modo geral observou-se que quando as vazões e profundidades são muito baixas e a velocidade elevada se obteve valores elevados para o k_2 , conforme os resultados obtidos nas seções fluviométricas das bacias Menino Deus IV e João Goulart. Os rios com baixas profundidades e altas velocidades tendem a possuir maiores k_2 , devido à maior facilidade de transferência ao longo da profundidade e à criação de maiores turbulências na superfície. Em condições de baixas vazões os valores do k_2 são elevados (VON SPERLING, 2014).

Os resultados para o k_2 obtidos na seção fluviométrica das bacias João Goulart e RSC 287 indicaram que possivelmente exista um limite quanto às características hidrodinâmicas para a aplicação do método, principalmente a vazão.

Na seção fluviométrica da bacia João Goulart os valores de vazão e profundidade média foram baixos e a velocidade média alta. Frequentemente os valores das vazões e profundidade foram acima dos apresentados pela seção fluviométrica da bacia Menino Deus IV, principalmente a profundidade média, o que possibilitou a determinação do coeficiente facilmente. Já na seção fluviométrica da bacia Menino Deus IV houve uma superestimação do valor do k_2 , possivelmente devido a haver altas taxas de reaeração, ocasionadas pela presença de baixa profundidade na seção fluviométrica, como afirma Chapra (1997).

Na seção fluviométrica da bacia RSC 287 as características hidrodinâmicas diferiram bastante das demais seções fluviométricas das bacias analisadas. As vazões e profundidades

médias foram elevadas, as velocidades médias baixas, e os valores do k_2 baixos. Porém, os resultados para o k_2 na seção fluviométrica da bacia RSC 287 indicam não ser tão influenciados pelas características hidrodinâmicas, uma vez que valores semelhantes foram obtidos por Ávila (2014) com características hidrodinâmicas diferentes.

5.3 CORRELAÇÃO DE PEARSON

A correlação de Pearson foi realizada com os k_2 e as variáveis analisadas na seção fluviométrica da bacia João Goulart. Nas demais bacias esta análise não foi realizada, por não terem sido obtidos valores satisfatórios para o k_2 . Na seção fluviométrica da bacia João Goulart, houve campanhas em que não apresentaram valores do k_2 coerentes com os demais. Dessa forma, compararam-se todos os valores do k_2 obtidos nas campanhas, com os valores calculados utilizando a equação 14, proposta por Formentini (2010). Essa equação foi proposta para a bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim com dados obtidos experimentalmente pelo método dos Traçadores Gasosos. Esse método apresenta-se como um dos métodos mais precisos para a determinação experimental do k_2 (Formentini, 2010). O valor da declividade usado na equação 14 foi obtido do trabalho de Ávila (2014), sendo 3,98%. A autora determinou essa característica hidrodinâmica na mesma seção fluviométrica desse estudo na bacia João Goulart.

$$k_2 = 836 \cdot (v \cdot S)^{0,524} \cdot Q^{-0,015}, \quad (14)$$

sendo:

- v : velocidade média (m/s);
- S : declividade (m/km);
- Q : vazão (m^3/s).

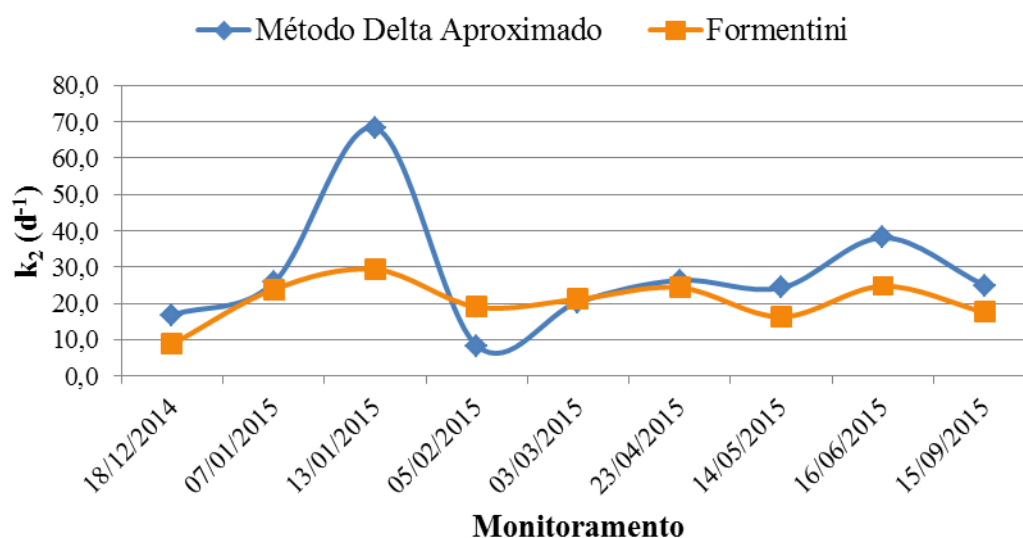
Na tabela 22 observa-se a comparação dos valores observados e calculados com a equação de Formentini (2010). As campanhas 17/03/2015, 31/03/2015, 07/04/2015, 14/04/2015, 05/05/2015 e 12/08/2015 foram retiradas do banco de dados para a realização da correlação, devido à incompatibilidade na comparação dos resultados com a equação de Formentini (2010). Nessas campanhas com resultados incoerentes, as condições do rio não foram adequadas para a determinação do k_2 . No decorrer do monitoramento do perfil de OD, outros fatores não analisados nesse estudo podem ter influenciado no comportamento do OD no perfil. A figura 43 mostra graficamente os valores do k_2 determinados pelo Método Delta

Aproximado e calculados, referentes às campanhas que foram usadas na correlação de Pearson.

Tabela 22 - Comparação do k_2 determinado por meio do Método Delta Aproximado e equação proposta por Formentini (2010)

Data da campanha	k_2 - Método Delta Aproximado (d^{-1})	k_2 - Formentini (2010) (d^{-1})
18/12/2014	16,9	8,8
07/01/2015	25,8	23,9
13/01/2015	68,4	29,4
05/02/2015	8,4	19,1
03/03/2015	20,4	21,2
17/03/2015	7,4	24,1
31/03/2015	5,7	29,4
07/04/2015	7,9	26,7
14/04/2015	11,1	23,7
23/04/2015	26,4	24,4
05/05/2015	34,9	22,4
14/05/2015	24,3	16,3
16/06/2015	38,1	24,7
12/08/2015	42,6	7,9
15/09/2015	25,0	17,6

Figura 43 - Valores do k_2 observado pelo Método Delta Aproximado e calculado pela equação de Formentini (2010)



De acordo com a correlação de Pearson (Tabela 23) o k_2 (observado) tem correlação positiva com a vazão, profundidade média, velocidade média e o k_2 calculado com a equação

de Formentini (2010). A correlação é significativa, como pode ser observado pelo p-valor, sendo menor que o nível de significância adotado de 5%. Em pequenos rios, como é o caso da bacia João Goulart, a vazão, profundidade média, velocidade média são características que influenciam diretamente no k_2 (MATOS et al., 2011; HWA-SEONG et al., 2012).

Tabela 23 - Correlação do k_2 com os parâmetros analisados na bacia João Goulart

	Q	P	v	k_2 Formentini (2010)	OD	T _{média}	C _{saturação}	DOD
Correlação de Pearson	0,862	0,734	0,780	0,688	0,372	0,158	-0,100	-0,565
P-valores	0,003	0,024	0,013	0,041	0,325	0,685	0,797	0,113

Na bacia RSC 287 não foi possível fazer a correlação de Pearson, devido ao pequeno número de campanhas realizadas, e a influência da captação de água para irrigação. Não se realizou a correlação com as campanhas do trabalho de Ávila (2014) pelo fato de serem realizados em épocas diferentes. A bacia possui uma elevada sazonalidade quanto às características hidrodinâmicas.

6 CONCLUSÕES

O estudo referente á viabilidade de determinação experimental do k_2 por meio do Método Delta Aproximado permite apresentar as seguintes conclusões:

- O Método Delta Aproximado demonstrou experimentalmente ser de fácil aplicação e baixo custo. No entanto, há uma diversidade de limitações em sua aplicação, tornando-o inviável em determinadas condições. O método é extremamente frágil às alterações nas características do rio, tanto quantitativas quanto qualitativas;

- O perfil de OD foi o ponto principal na determinação da viabilidade do método. A ausência de um perfil de OD adequado impossibilitou o cálculo da determinação do k_2 , devido as variáveis da equação 5 serem obtidas da curva no perfil de OD. A determinação do k_2 por meio do Método Delta Aproximado apresentou-se viável apenas nas seções fluviométricas das bacias João Goulart e RSC 287, não sendo viável nas seções fluviométricas das bacias Cancela-Tamandaí, Menino Deus II e Menino Deus IV;

- Na seção fluviométrica da bacia João Goulart foi possível determinar o k_2 pelo método, no entanto foram identificadas as seguintes limitações de aplicabilidade: i) não pode haver um grande aumento da vazão, sendo viável para vazões de até $1 \text{ m}^3/\text{s}$; ii) haver presença regular de carga orgânica na seção; iii) o Φ não deve ser muito baixo. Os valores do k_2 na seção fluviométrica da bacia João Goulart variaram de 5,7 a $68,4 \text{ d}^{-1}$. Os valores foram bem variáveis, comparando-se com os coeficientes dos estudos de Ávila (2014), de aproximadamente $30,0 \text{ d}^{-1}$, e Formentini (2010), sendo valores próximos de $15,0 \text{ d}^{-1}$ e $30,0 \text{ d}^{-1}$;

- Na seção fluviométrica da bacia RSC 287 foi possível determinar o k_2 pelo Método Delta Aproximado. Porém, nas campanhas com valores de vazões maiores que $3,64 \text{ m}^3/\text{s}$ e com presença de captação de água para irrigação de lavouras, o método não foi viável, devido a não conformidade do perfil de OD. Dessa forma, este método mostrou-se viável nesta seção quando as vazões eram menores, como apresentado por Ávila (2014). Os valores do k_2 obtidos experimentalmente nesse estudo, para a seção fluviométrica da bacia RSC 287, variaram de 8,40 a $13,75 \text{ d}^{-1}$, sendo coerente com o proposto na literatura, onde rios com vazões e profundidades altas, e velocidades baixas, apresentam baixos k_2 ;

- Na seção fluviométrica da bacia Cancela-Tamandaí não foi possível determinar o k_2 . O lançamento e acúmulo de conteúdo orgânico nos rios fez com que não houvesse um perfil de OD adequado, inviabilizando o método;

- Na seção fluviométrica da bacia Menino Deus II encontrou-se diferentes situações quanto à obtenção do perfil de OD. De modo geral, o Método Delta Aproximado não foi

viável para determinar o k_2 , devido à ausência de um perfil de OD adequado. Não foi possível associar a inviabilidade de aplicação do método a uma característica específica da bacia, das condições das campanhas, da seção fluviométrica ou dos rios, exceto para as campanhas com temperaturas baixas.

- Na seção fluviométrica da bacia Menino Deus IV o Método Delta Aproximado não foi viável na determinação do k_2 . Devido ao mínimo DOD ter ocorrido antes do meio-dia solar e por haver superestimação nos valores do k_2 , ocasionado pelos baixos valores de Φ ;

- De maneira geral o Método Delta Aproximado não se apresentou viável nas seguintes condições: i) vazão maior que $1 \text{ m}^3/\text{s}$ para a seção fluviométrica da bacia João Goulart e maior que $3,64 \text{ m}^3/\text{s}$ na seção fluviométrica da bacia RSC 287; ii) rios com baixo conteúdo orgânico; iii) rios com lançamento e acúmulo elevado de MO; iv) mínimo DOD antes do meio-dia solar e/ou baixos Φ ; v) temperaturas baixas; vi) e rios com captação de água;

- As características hidrodinâmicas vazão, velocidade média e profundidade média apresentaram correlação positiva significativa com o k_2 na bacia João Goulart. Na Bacia RSC 287 não foi realizada correlação, devido ao baixo número de campanhas e não confiabilidade dos perfis, devido à captação de água para irrigação.

7 RECOMENDAÇÕES

A avaliação do k_2 juntamente com os parâmetros P_{av} e R poderá apresentar melhores resultados quanto à viabilidade do Método Delta Aproximado, devido ao método compensar parcialmente a sua sensibilidade com a união desses parâmetros. Dessa forma, torna-se necessário a utilização de um equipamento que registre os perfis de OD, em um tempo de 24 horas, para que possam ser calculados os três parâmetros.

Nas seções fluviométricas das bacias Cancela-Tamandaí, Menino Deus II e Menino Deus IV em que não foi possível ser determinado o k_2 pelo Método Delta Aproximado, se recomenda a utilização de outra metodologia. A sugestão metodológica nestas bacias seria o método dos traçadores gasosos com o uso do GLP, sendo um método eficiente e econômico.

Na seção fluviométrica da bacia Menino Deus II em que não se obteve uma conclusão geral quanto à impossibilidade de determinar o k_2 , devido à ausência do perfil de OD adequado. Recomenda-se a avaliação de parâmetros mais pertinentes e específicos do que os avaliados nesse estudo. Como exemplo a avaliação da concentração de clorofila no rio, buscando-se avaliar a presença de fitoplâncton, o que poderá ser uma resposta para a inviabilidade do método.

Na bacia RSC 287 recomenda-se a continuidade de realização das campanhas em épocas que não apresente as limitações encontradas nesse estudo, ou seja, vazões muito altas e período de retirada de água para irrigação. No intuito de analisar a correlação do k_2 com as características hidrodinâmicas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. S. M. **Condições de oxigenação e desoxigenação de um trecho do rio Uberabinha no município de Uberlândia**. 2013. 99 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2013.

ANDRADE, L. N. Autodepuração dos corpos d'água. **Revista da Biologia**. v. 5, p. 16-19, 2010.

APHA – American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 nd.ed. Washington: APHA-AWWA-WEF, 2012.

ÁVILA, L. C. **Modelagem da qualidade da água utilizando coeficientes bibliográficos e experimentais – aplicação ao Rio Vacacaí-Mirim**. 2014. 99 f. Dissertação de mestrado. (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

BARBOSA JR, A. R. et al. Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em rios naturais. Parte 2: Aplicação e comparação dos métodos. **Revista escola de Minas**, v. 58, n. 2, p. 139-145, 2005.

BENNETT, J. P.; RATHBUN, R. E. Reaeration in Open-Channel Flow. Washington: United States Department of the Interior. Geological Survey, p. 86, 1972.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. Cap. 11, p. 260-261.

CHAPRA, S. C. **Surface water-quality modeling**. WCB-McGraw-Hill. Boston, 1997. 843 p.

CHAPRA, S. C.; DI TORO, D. M. Delta Method for estimating primary production, respiration, and reaeration in streams. **Journal of Environmental Engineering**, v. 117, n. 5, p. 640-655, 1991.

CORREA-GONZÁLEZ, J. C. et al. Photosynthesis, respiration and reaeration in a stream with complex dissolved oxygen pattern and temperature dependence. **Ecological Modelling**, 273, p. 220-227, 2014.

COSTA, O. S., Determinação Indireta do Coeficiente de Reaeração através de dissolução unidimensional de sondas de ácido oxálico. In:t XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

DI TORO, D. M. Algae and dissolved oxygen. **Manhattan College Summer Institute Notes**, Manhattan College, Bronx, 1981.

FORMENTINI, T. A. **Coefficientes de desoxigenação de reaeração superficial em trechos do Rio Vacacaí Mirim**, 2010. 91p. Dissertação de Mestrado. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

GASTALDINI, M. C. C.; MENDONÇA, A. S. F. Conceitos para avaliação da qualidade da água. In: **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Cap. 15. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.

GIORGETTI, M. F.; SCHULZ, H. E. Contribuição para a determinação do coeficiente de reoxigenação superficial em corpos d'água. In: II Congresso Latino Americano de transferência de calor e matéria, 1986, São Paulo-SP. **Anais...** Vol. 3, São Paulo, 1986. p. 1687-1697.

GIORGETTI, M. F.; SCHULZ, H. E. Sobre o Método da Sonda Solúvel Flutuante para a determinação Indireta do Coeficiente de reoxigenação Superficial em Corpos de Água. In: III Encontro Nacional de Ciências Térmicas, 1990, Itapema-SC. **Anais...** Vol. II, Itapema, 1990, p. 1079-1084.

HORN, J. F. C. et al. Determinação do Coeficiente de Reaeração (K_2) em pequeno Rio de Encosta: Estudo de caso. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves-RS. **Anais...** Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

HWA-SEONG, J. et al. Mixed Tracer Injection Method to Measure Reaeration Coefficients in Small Streams. **Water Air Soil Pollut.** Murray, v. 223, p. 5297-5306, Ago., 2012.

Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Tempo na sua cidade. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

JAIN, S. K.; JHA, R. Comparing the stream re-aeration coefficient estimated from ANN and empirical models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 50, n. 6 , p. 1037-1052, 2005.

LAENEN, A.; WOO, W. H.; **Stream velocities e reaeration coefficients for the south Umpqua River between Tiller and Roseburg, Oregon, 1991**, Water –Resources Investigations report 92-4191, U.S. Geological Survey, Portland-Oregon, 1994, 20 p.

LIMA, C. A. A. **O uso do modelo QUAL2E na simulação da qualidade das águas do Rio Jacaré-Guaçu**. 1997. 179 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

LONG, S-X. et al. Relationship between phytoplankton and environment factors in Lake Hongfeng. **Journal of Environmental Biology**, Lucknow – India, v. 34, p. 445-449, 2013.

MANSOR, M. T. C.; FILHO, J. T.; ROSTON, D. M., Avaliação preliminar das cargas difusas de origem rural, em uma bacia do Rio Jaguari, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 715-723, 2006.

MATOS, A. T. et al. Coeficiente de reaeração em três trechos do Rio Pomba (MG), obtidos nos períodos chuvosos e seco. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v. 19, n. 4, p. 361-369, 2011.

MCBRIDE, G. B.; CHAPRA, S. C. Rapid Calculation of Oxygen in Streams: Approximate Delta Method, **Journal of Environmental Engineering**. v. 131, n. 3, p. 336-342, 2005.

MELCHING, C. S.; FLORES, H. E. Reaeration equations derived from U. S. Geological Survey database. **Journal of Environmental Engineering**. v. 125, n. 5, p. 407-414, 1999.

MENDONÇA, M. W. **O Método L-BFGS com Fatoração Incompleta para a Resolução de Problemas de Minimização**. 2005. 72 p. Dissertação. (Mestrado em Matemática e Computação Científica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MORSE, N. et al. Using sound pressure to estimate reaeration in streams. **The north American Benthological Society**. 26 (1) , p. 28-37, 2007.

MOTA, S. **Preservação e Conservação de Recursos Hídricos**. 2 ed. Rio De Janeiro: ABES, 1995. 186 p.

NR- Norma Regulamentadora. **NR 15: Atividades e operações insalubres**. Anexo 11, 2014.

O'CONNOR, D. J.; DI TORO, D. M. Photosynthesis and oxygen balance in streams, **Journal of the Sanitary Engineering division**. v. 96, n. SA 2, p. 547-571, 1970.

ODUM, H. T. Primary Production in Flowing waters, **Limnology and Oceanography**. v. 1, n. 2, p. 102-117, 1956.

OMOLE, D. O.; LONGE, E. O.; MUSA, A. G. An approach to Reaeration Coefficient Modeling in Local Surface Water Quality Monitoring. **Environmental Modeling & Assessment**. v. 18, p. 85-94, 2013.

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.

PAULA, L. M. **Avaliação da qualidade da água e autodepuração do Rio Jordão, Araguari (MG)**. 2011. 196 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

PINHEIRO, A.; FAHT, G.; SILVA, M. R. da. Determinação do coeficiente de reaeração em rios através do uso de traçador gasoso GLP. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 17, n.1, p. 107-116, 2012.

QUEIROZ, F. M.; MATOS, A. T.; VON SPERLING, M. Estimativa do coeficiente de reaeração da água em canal raso de fundo deslizante. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 20, n. 1, p. 79-88, 2015.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2015. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 25 jan. 2016.

RATHBUN, R. E.; GRANT, R. S. **Comparison of the radioactive and modified techniques for measurement of stream reaeration coefficients**. U.S. Geological Survey, Water Resources Division, 1978, 66p.

RUDOLPH, A.; AHUMADA, R.; PÉREZ, C.; Dissolved oxygen content as an index of water quality in San Vicent Bay, Chile (36° 45'S). **Environmental Monitoring and Assessment**, p. 89-100, 2002.

SANCHÉZ, E. et al. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. **Ecological Indicators**, v. 7, p. 315-328, 2007.

SANTOS, I. et al. **Hidrometria aplicada**. CEHPAR - Centro Hidráulico e Hidrologia Prof. Parigot de Souza, Curitiba-PR, 2001, 372 p.

SANTOS, S. A. **Carga poluidora difusa na água e nos sedimentos de bacia do Arroio Cadena – Santa Maria/RS**. 2014. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SILVA, D. D. et al. Falta de saneamento básico e as águas subterrâneas em aquífero freático: região do Bairro Pedra Noventa, Cuiabá (MT). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 43-52, 2014.

SILVEIRA, G. L. et al. Balanço de cargas poluidoras pelo monitoramento quali-quantitativo dos recursos hídricos em pequena bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 5-11, 2003.

SOARES, P. A.; PINHEIRO, A.; ZUCCO, E. Determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em rios. **Revista de Gestão de Água da América Latina**. v. 10, n. 2, p. 27-36, 2013.

SOUZA, M. M. **Carga de poluição difusa em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos**. 2012. 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SOUZA, M. M.; GASTALDINI, M. C. C. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 19, n. 3, p. 263-274, 2014.

STREETER, H. W.; PHELPS, E. B. **A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. III Factors concerned in the phenomena of oxidation and reaeration**, U. S. Public Health Bulletin, n. 146, 1925, 75 p.

TEIXEIRA, L. C. **Caracterização hidrossedimentométrica de uma pequena bacia hidrográfica e balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim**. 2015. 160 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

TSIVOGLU, E. C.; WALLACE, J. R. Characterizing stream reaeration capacity. **Environmental Protection Agency**, EPA-R3-72-012, Washington, 317 p. 1972.

VON SPERLING, M. Determinação do coeficiente de reaeração de cursos d'água (k_2) utilizando fórmulas empíricas. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande/MS, **Anais...** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, Editora UFMG, v. 1, 4 ed., 2014, 470 p.

APÊNDICE:

APÊNDICE A - GRÁFICOS DO PERFIL DE OD NA BACIA HIDROGRÁFICA CANCELA-TAMANDAÍ

Figura 44 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 08/12/2014

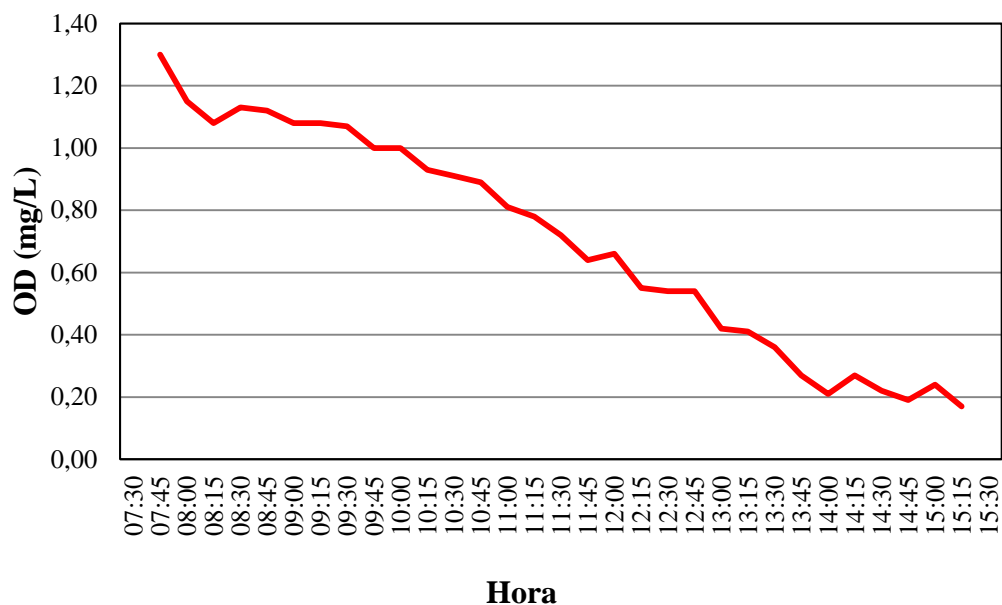


Figura 45 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 03/02/2015

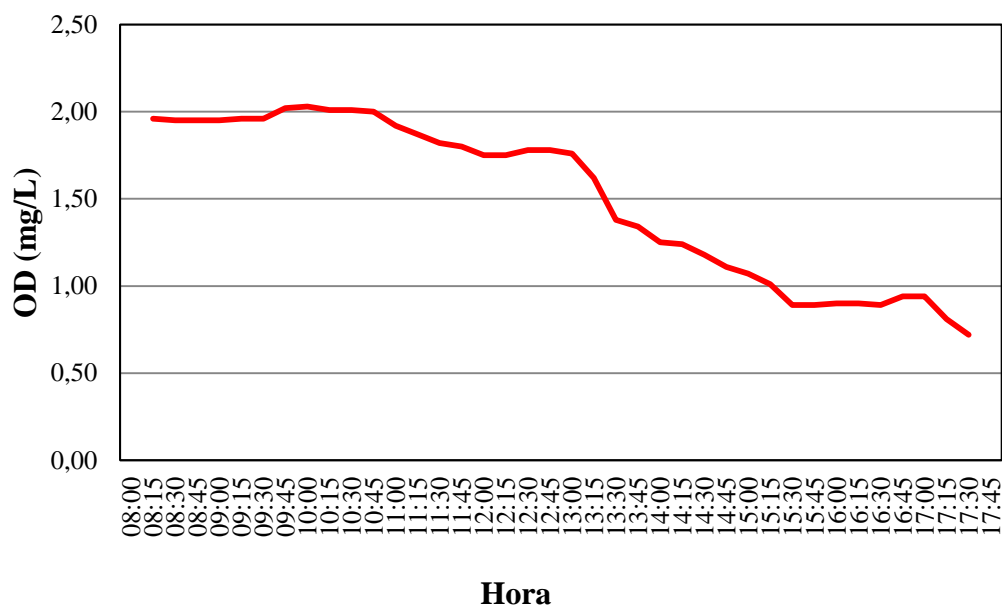


Figura 46 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 26/02/2015

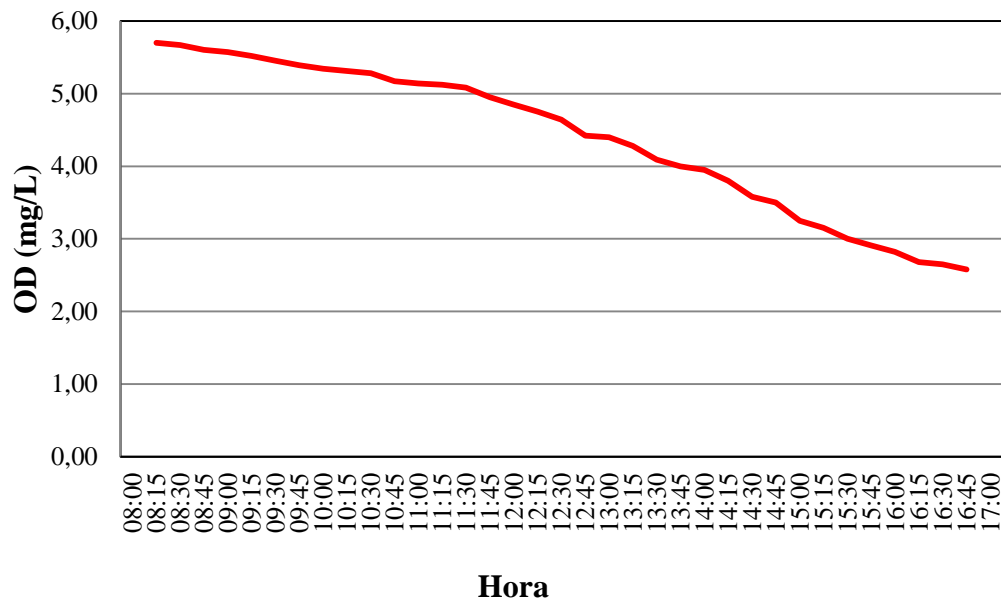


Figura 47 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 18/03/2015

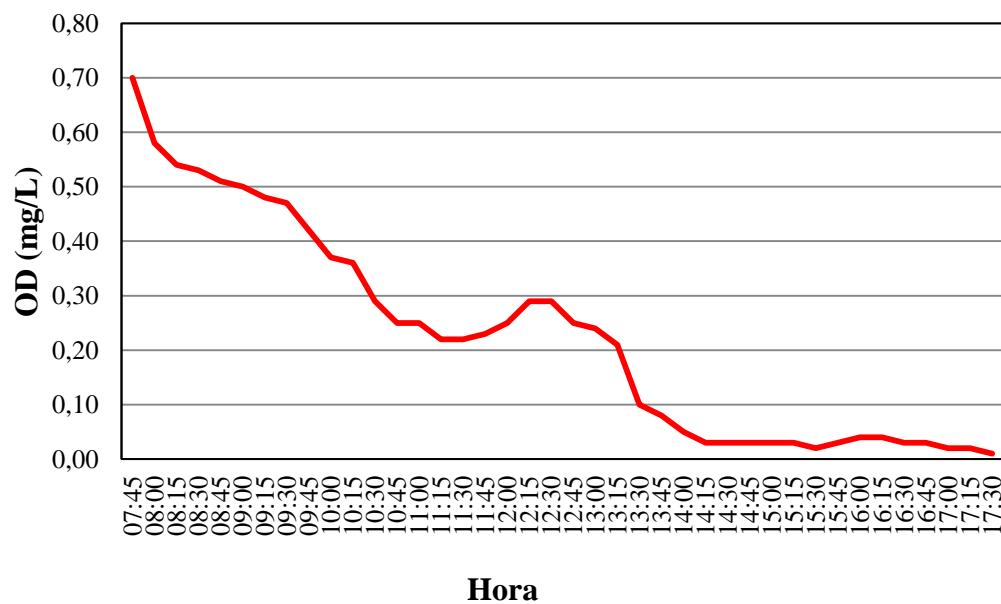


Figura 48 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 10/07/2015

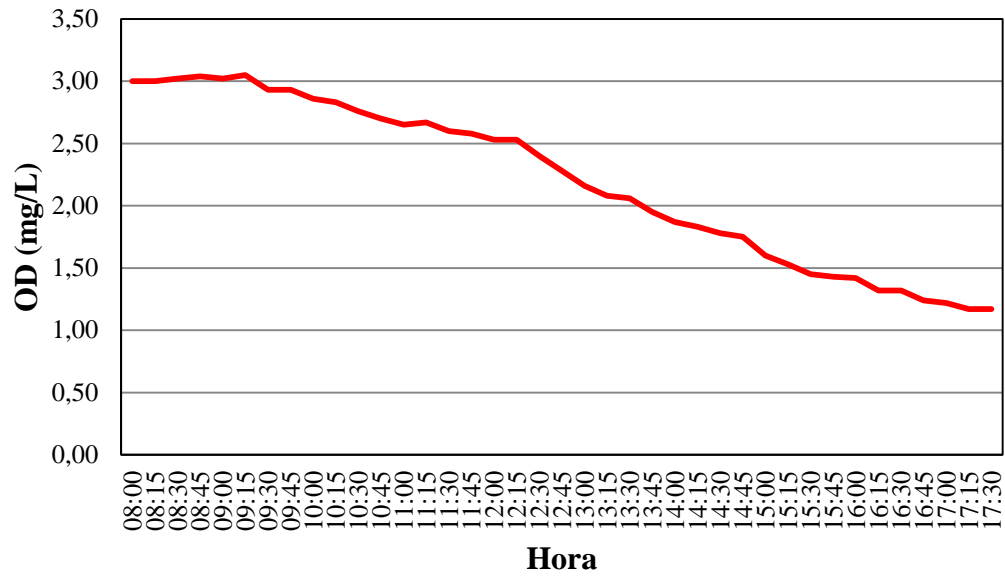
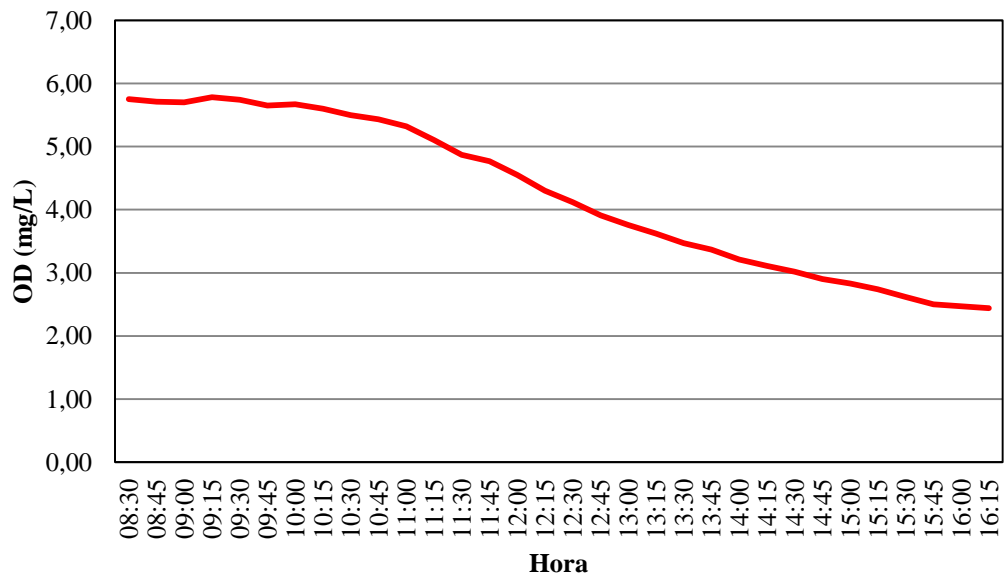


Figura 49 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí da campanha realizada em 23/10/2015



APÊNDICE B - GRÁFICOS DO PERFIL DE OD NA BACIA HIDROGRÁFICA MENINO DEUS II

Figura 50 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 17/12/2014

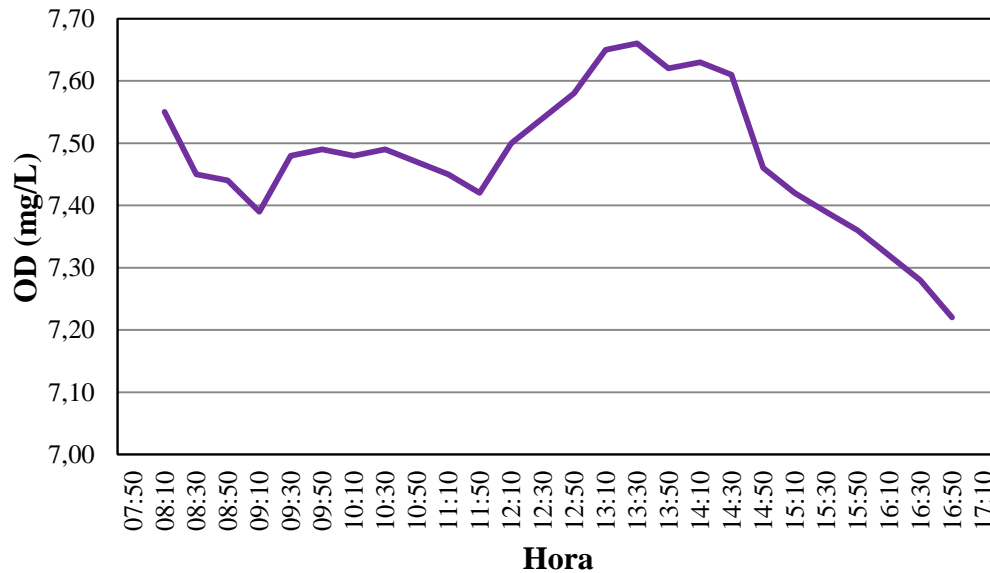


Figura 51 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 12/01/2015

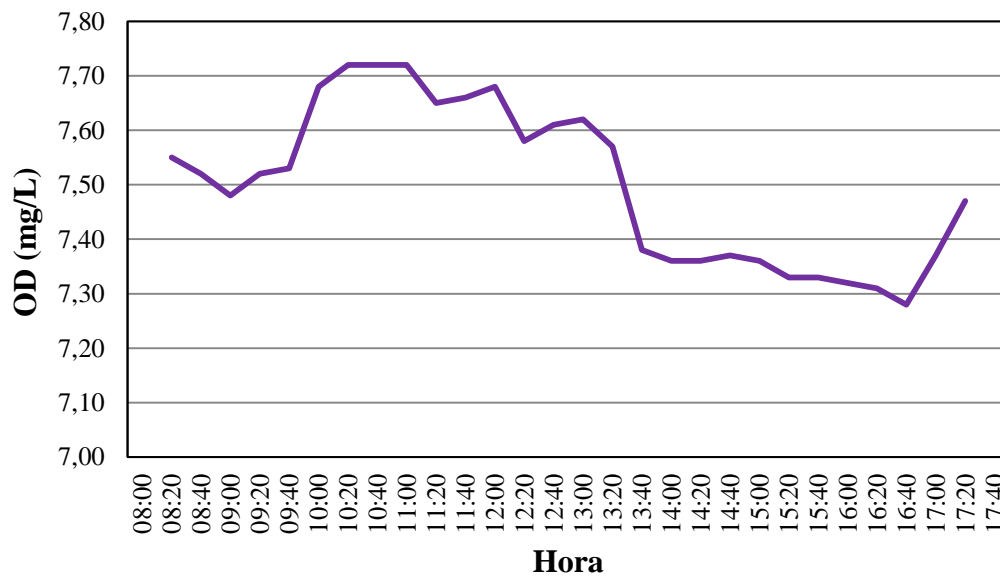


Figura 52 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 04/02/2015

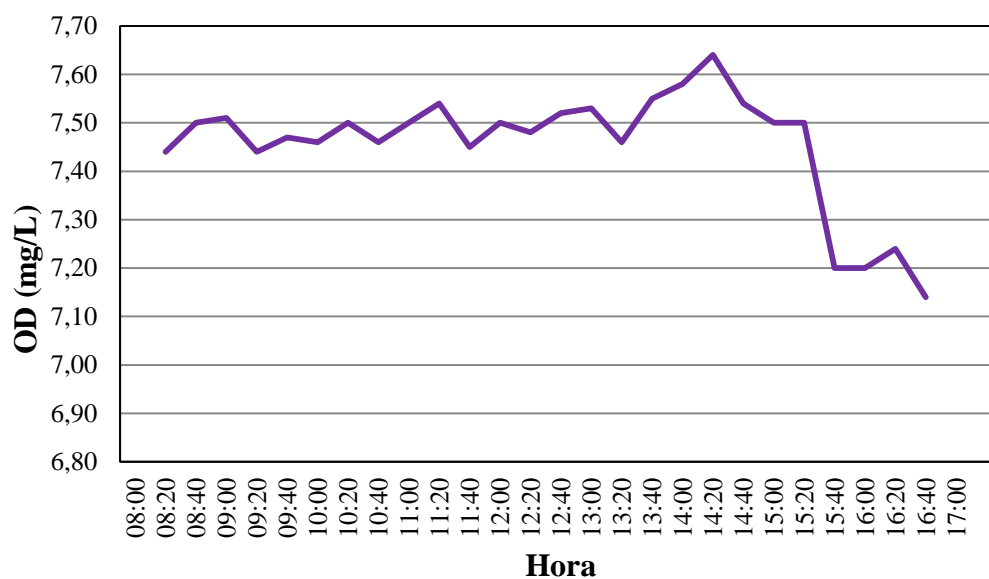


Figura 53 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 20/03/2015



Figura 54 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 10/04/2015

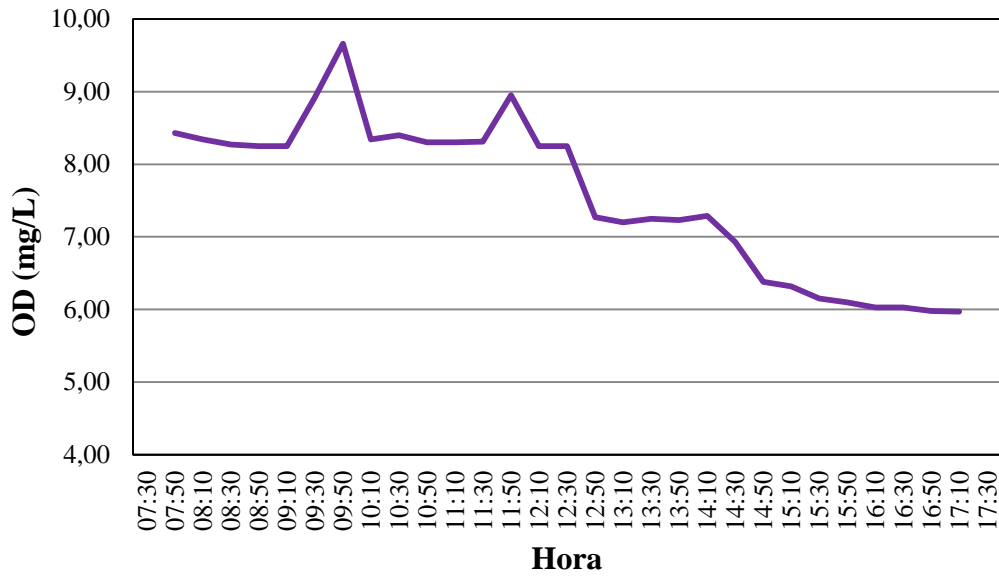


Figura 55 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 24/04/2015

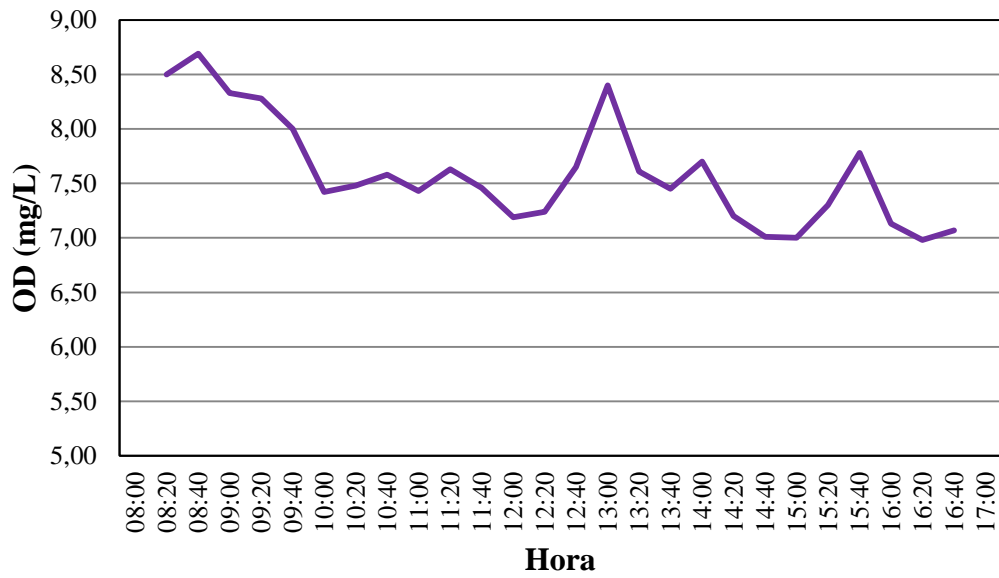


Figura 56 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 01/07/2015

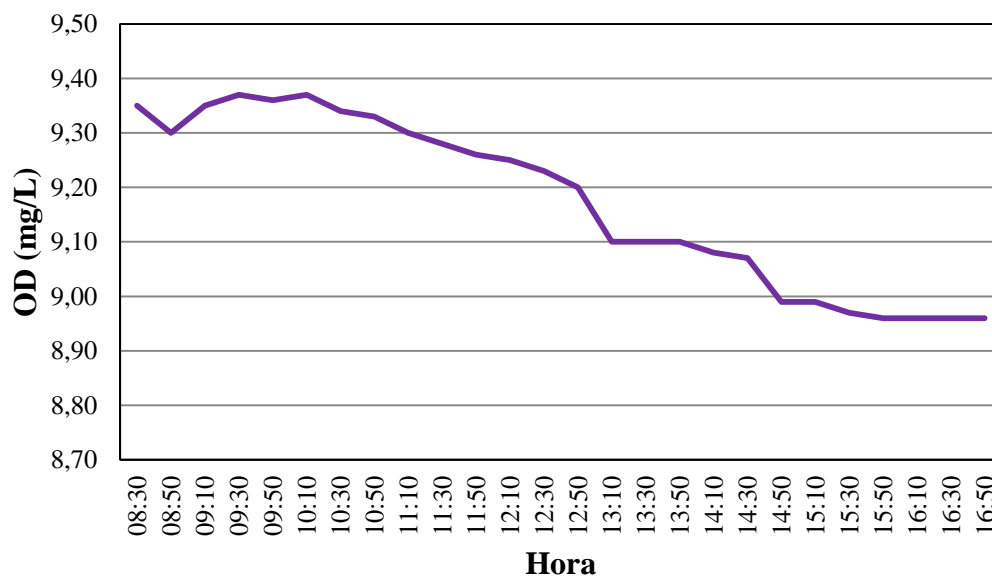


Figura 57 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 15/07/2015

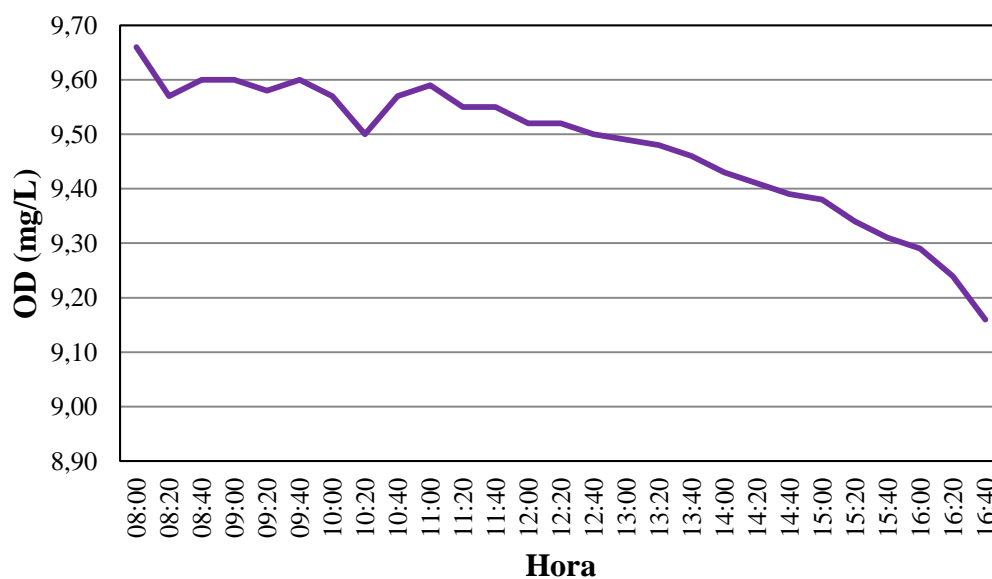


Figura 58 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 06/08/2015

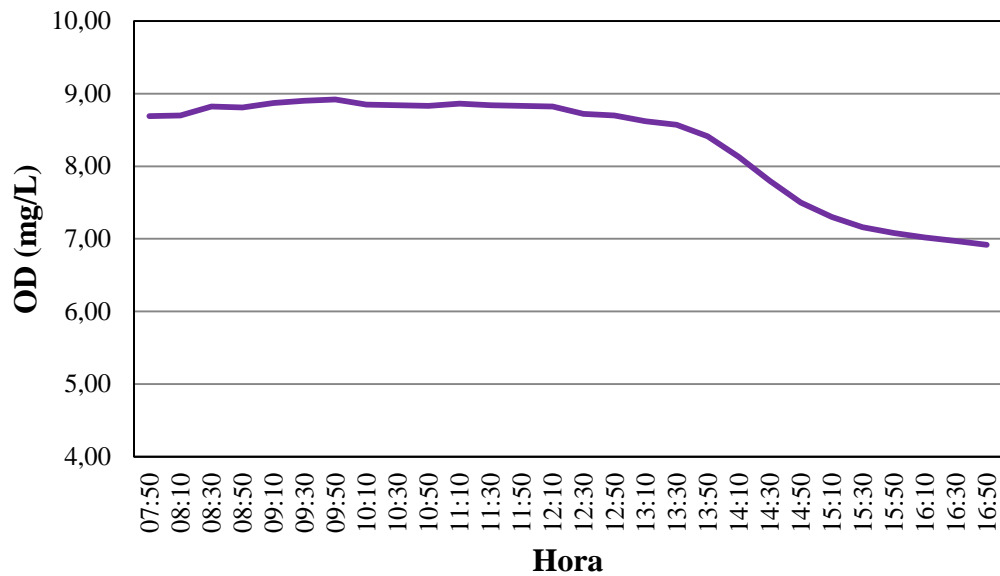
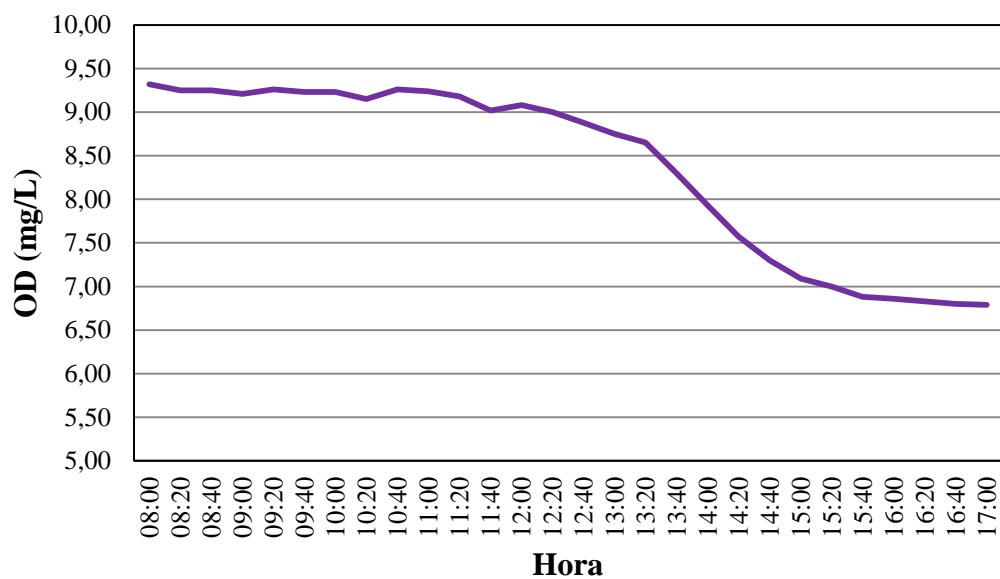


Figura 59 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus II da campanha realizada em 02/09/2015



APÊNDICE C - GRÁFICOS DO PERFIL DE OD NA BACIA HIDROGRÁFICA MENINO DEUS IV

Figura 60 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 17/12/2014

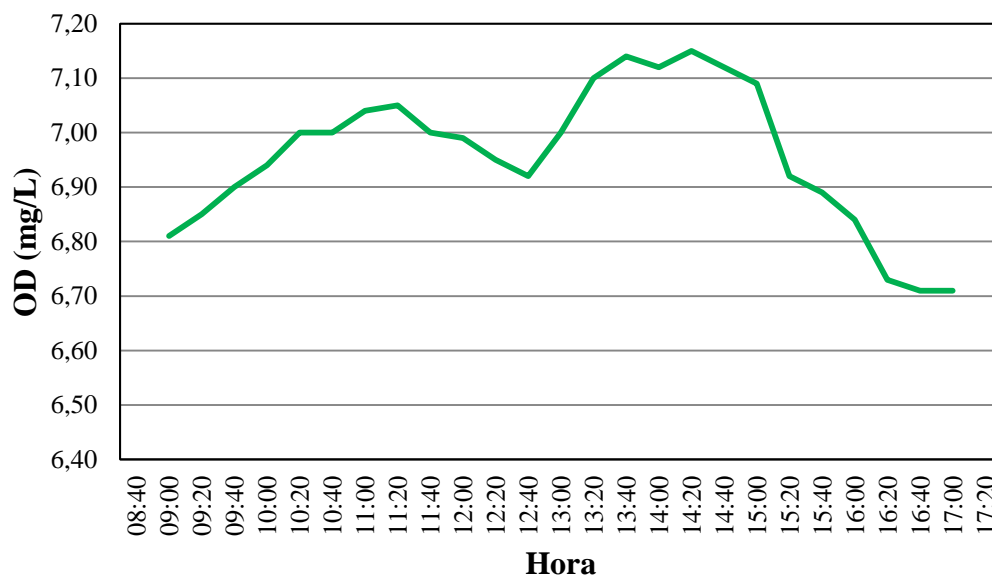


Figura 61 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 12/01/2015

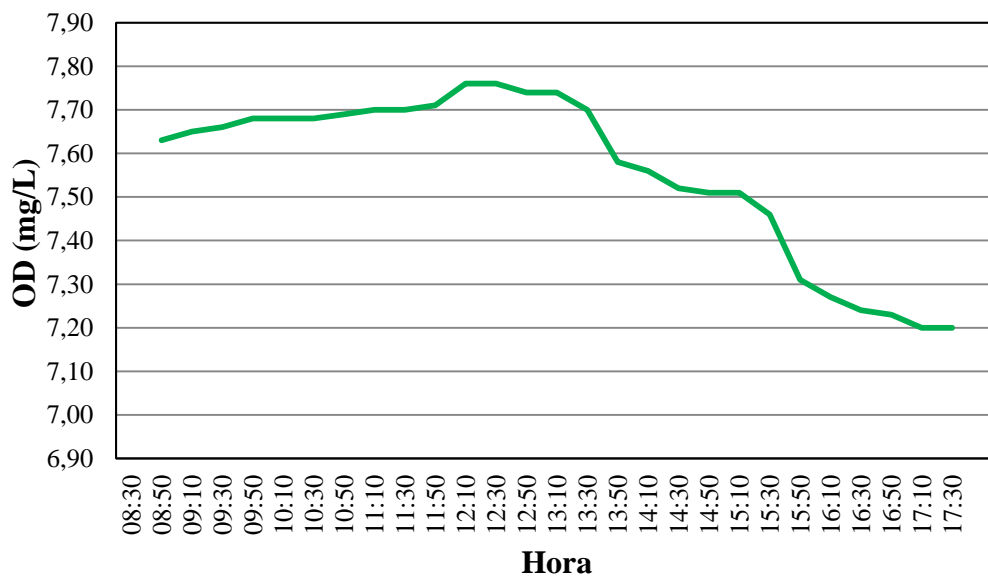


Figura 62 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 12/02/2015

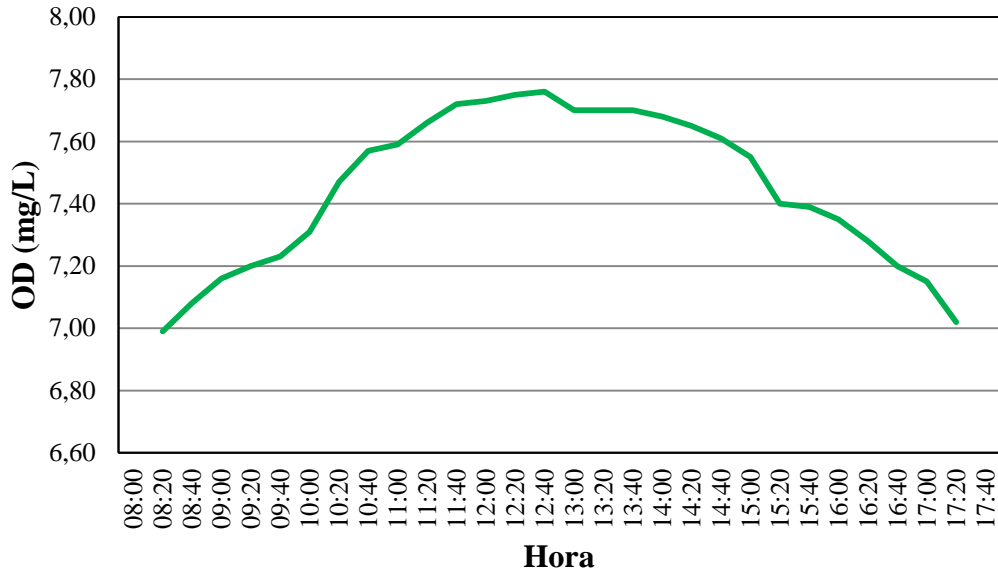


Figura 63 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 12/03/2015

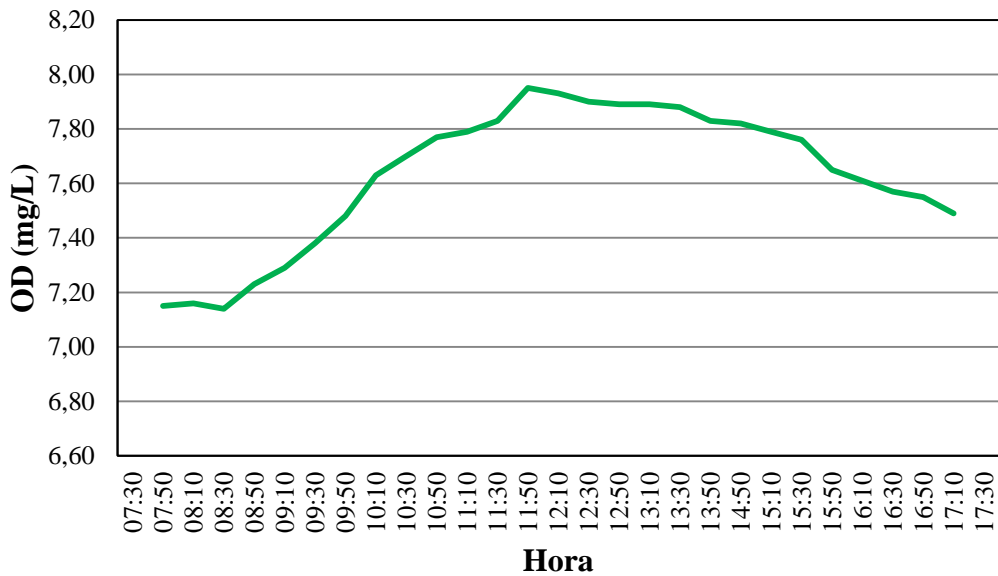


Figura 64 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 20/03/2015

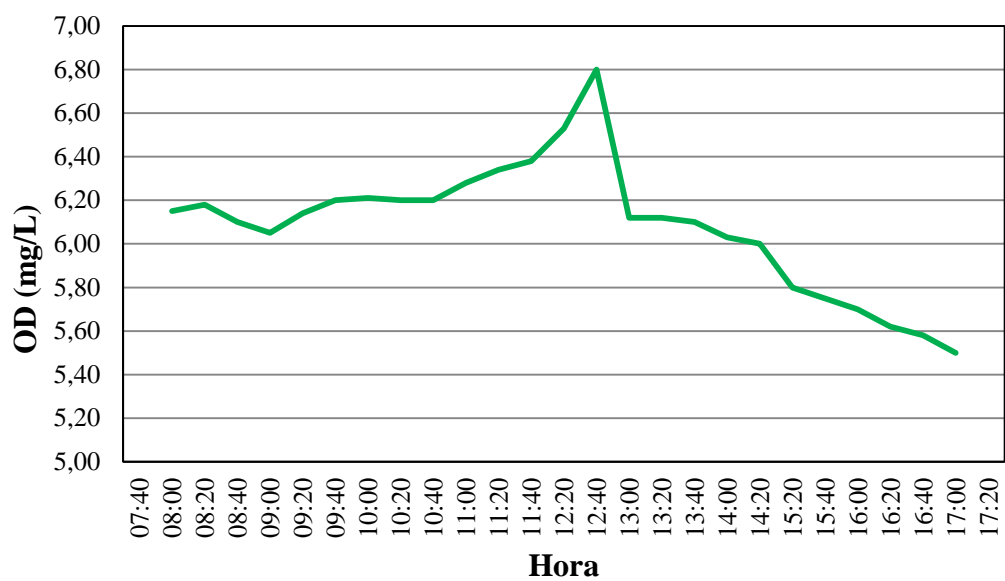


Figura 65 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 10/04/2015

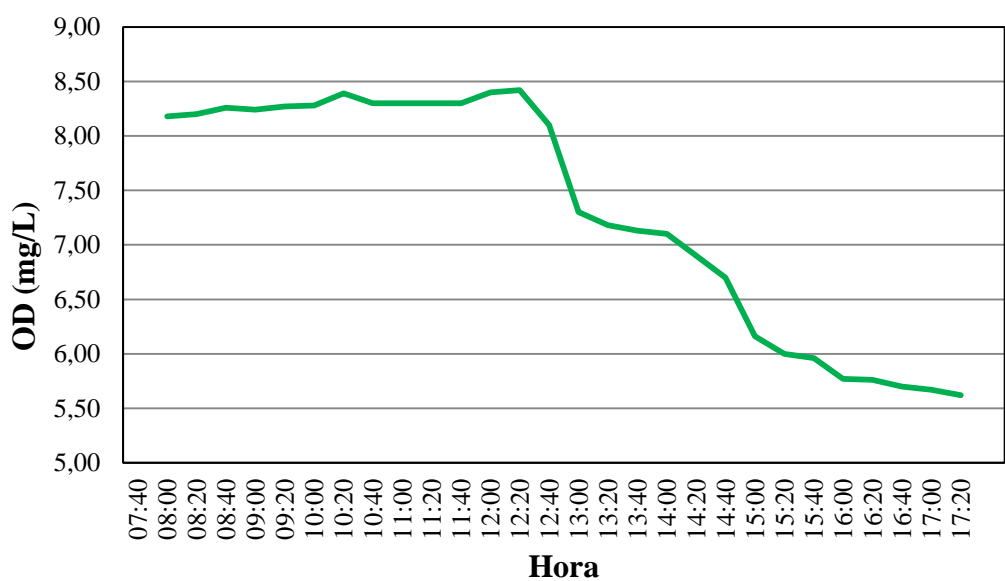


Figura 66 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 24/04/2015

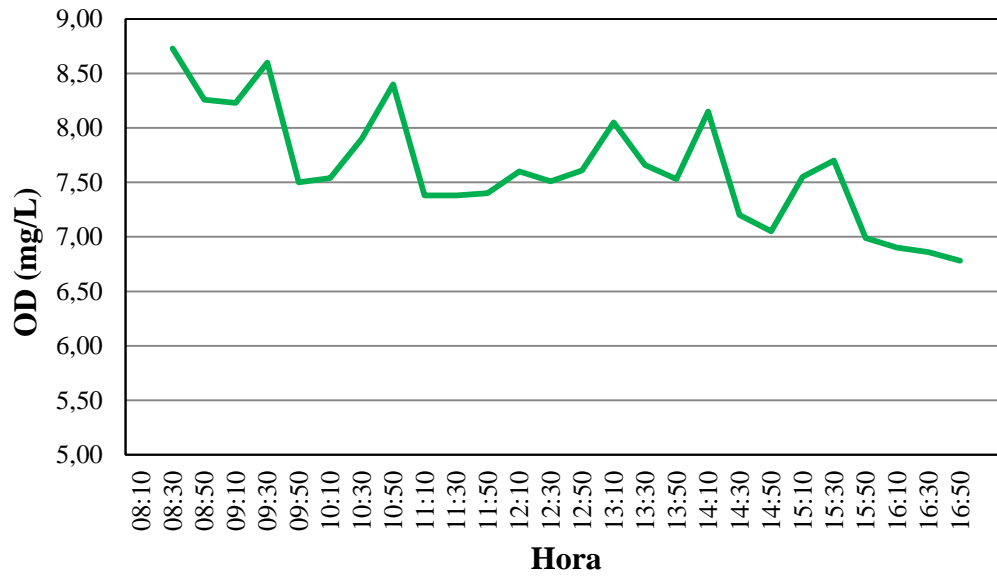


Figura 67 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 26/05/2015

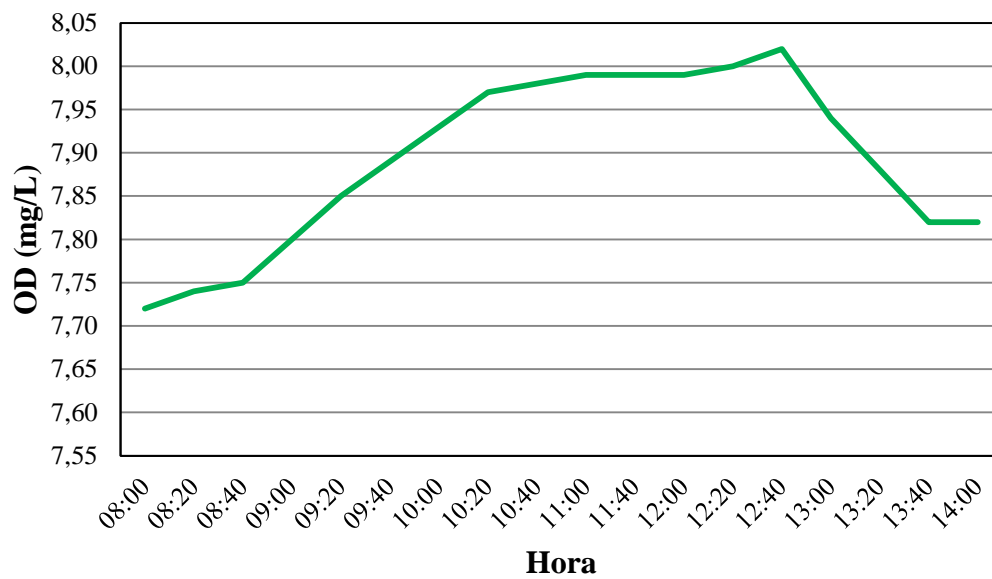


Figura 68 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 15/07/2015

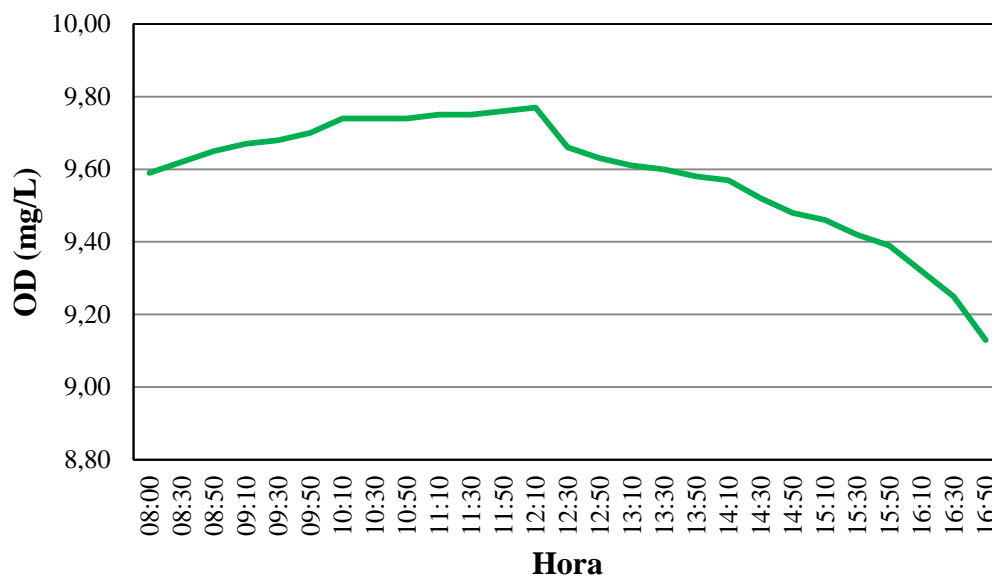


Figura 69 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 06/08/2015

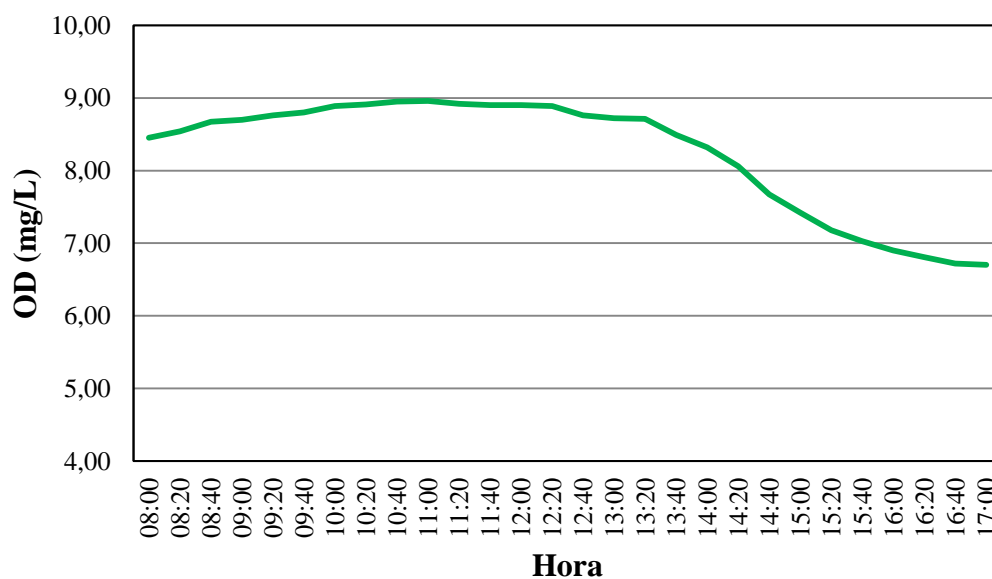
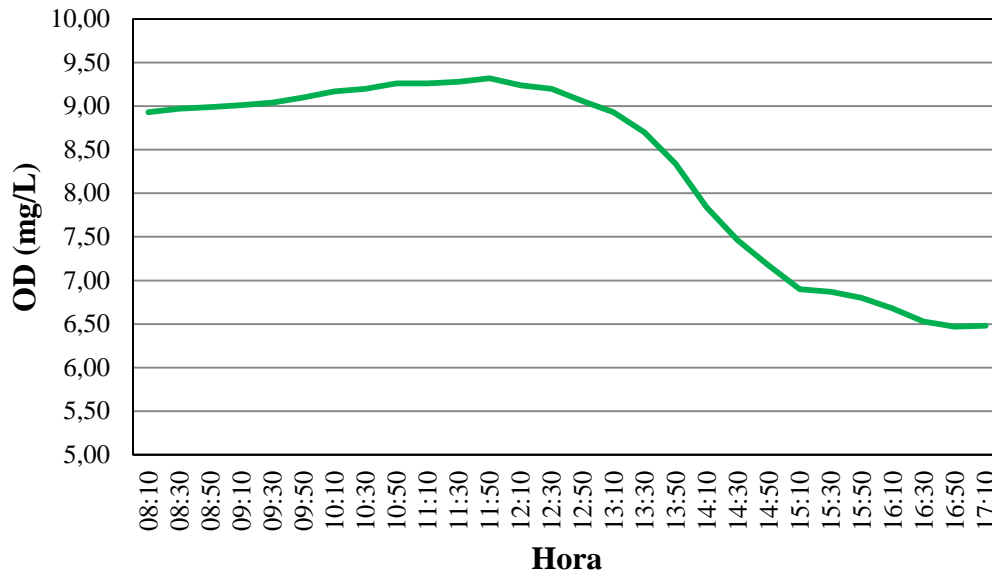


Figura 70 - Perfil de OD na bacia hidrográfica Menino Deus IV da campanha realizada em 02/09/2015



APÊNDICE D - GRÁFICOS DO PERFIL DE OD NA BACIA HIDROGRÁFICA JOÃO GOULART

Figura 71 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada 18/12/2014

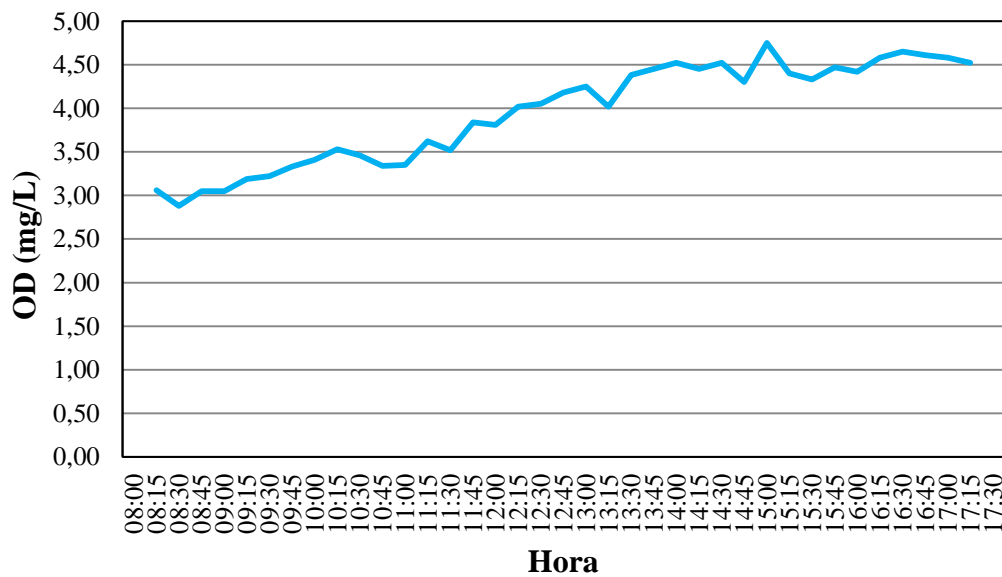


Figura 72 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 07/01/2015

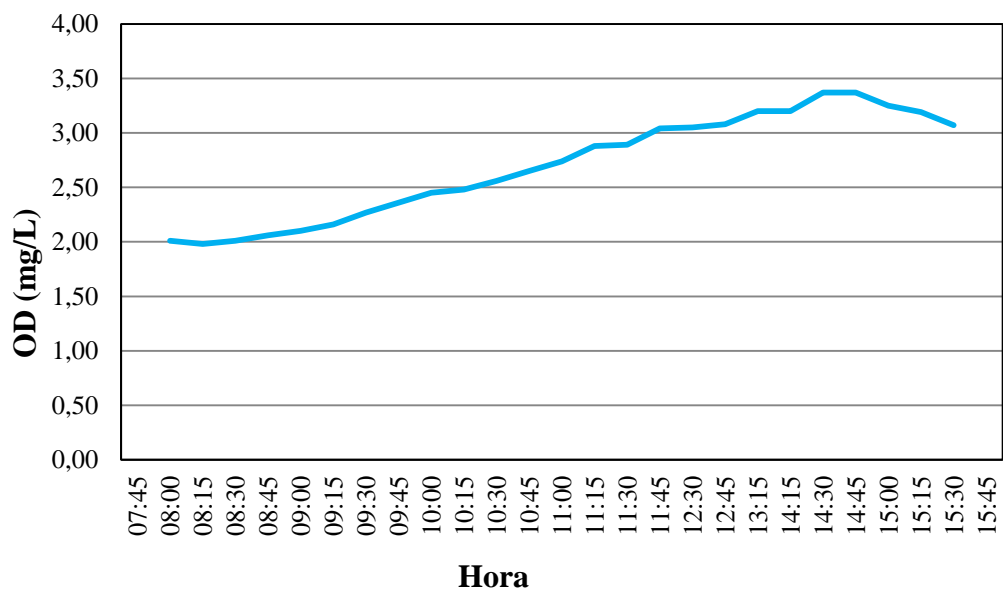


Figura 73 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 13/01/2015

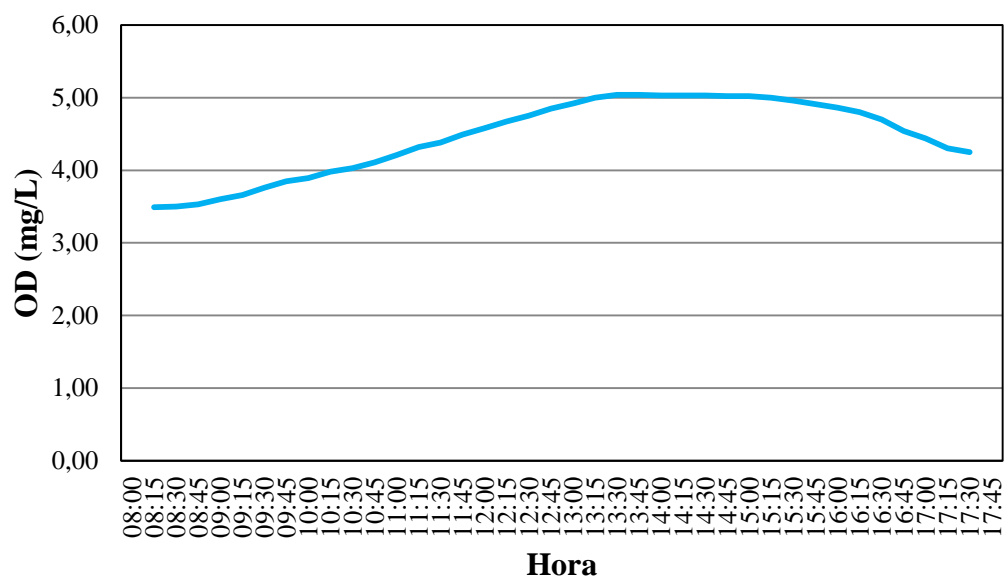


Figura 74 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 05/02/2015

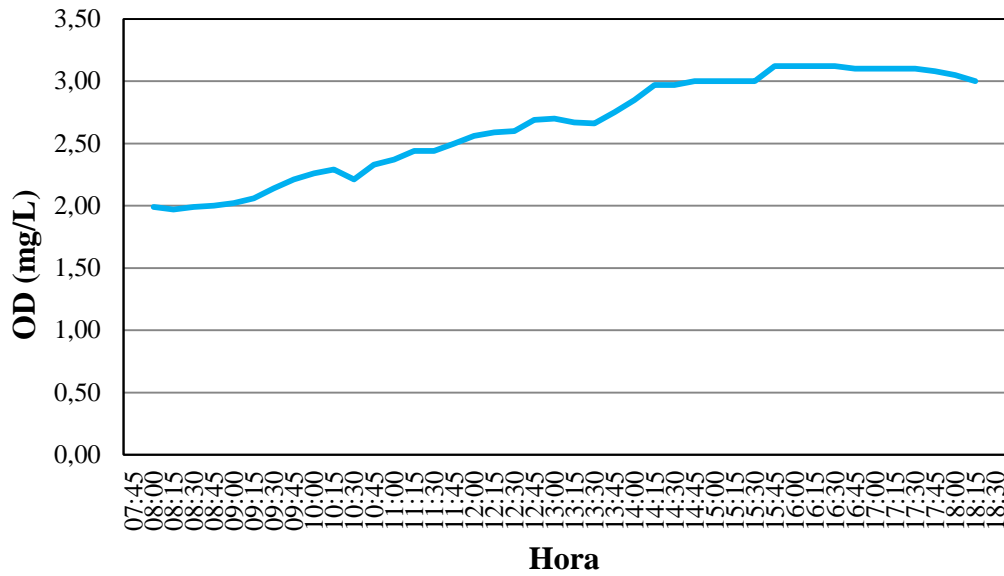


Figura 75 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 03/03/2015

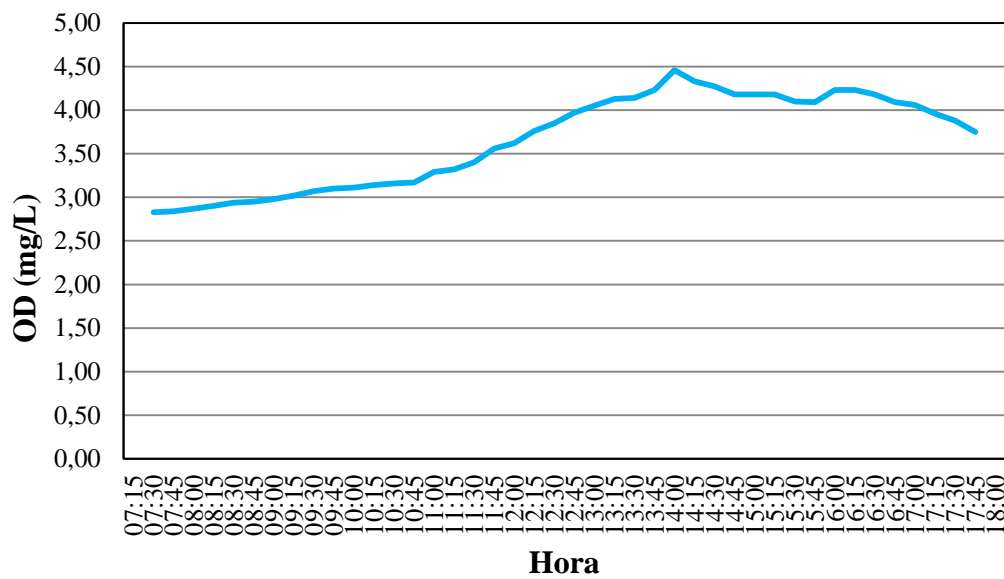


Figura 76 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 17/03/2015

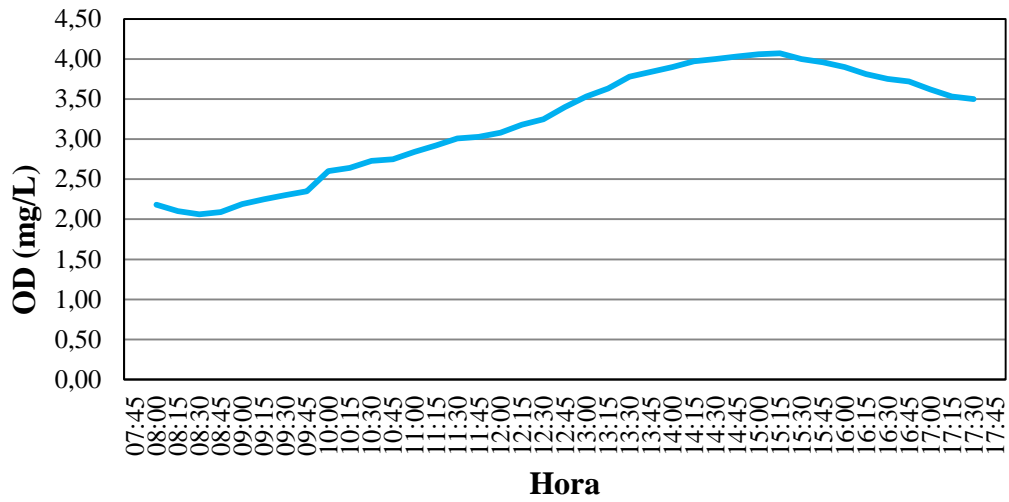


Figura 77 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 31/03/2015

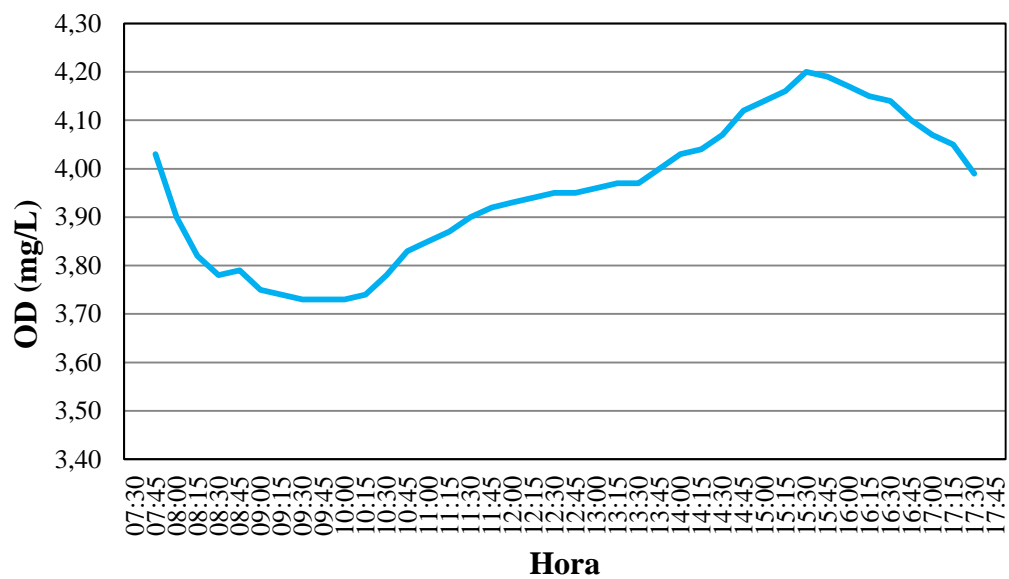


Figura 78 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 07/04/2015

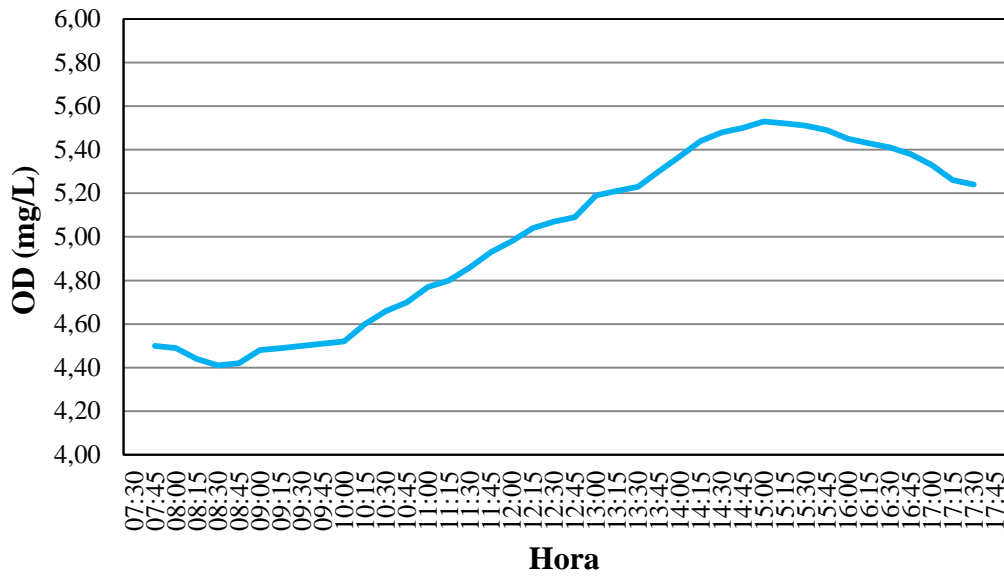


Figura 79 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 14/04/2015

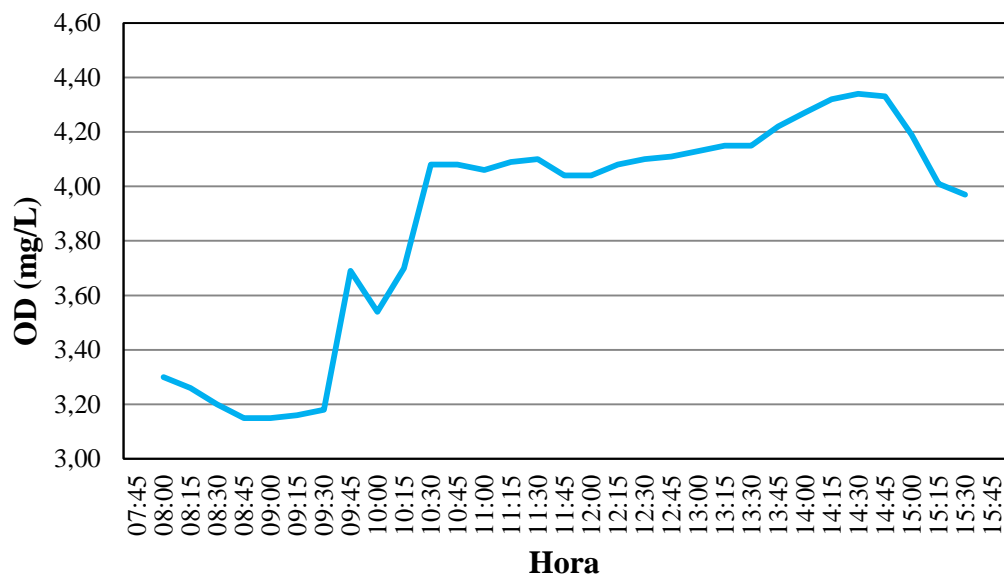


Figura 80 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 23/04/2015

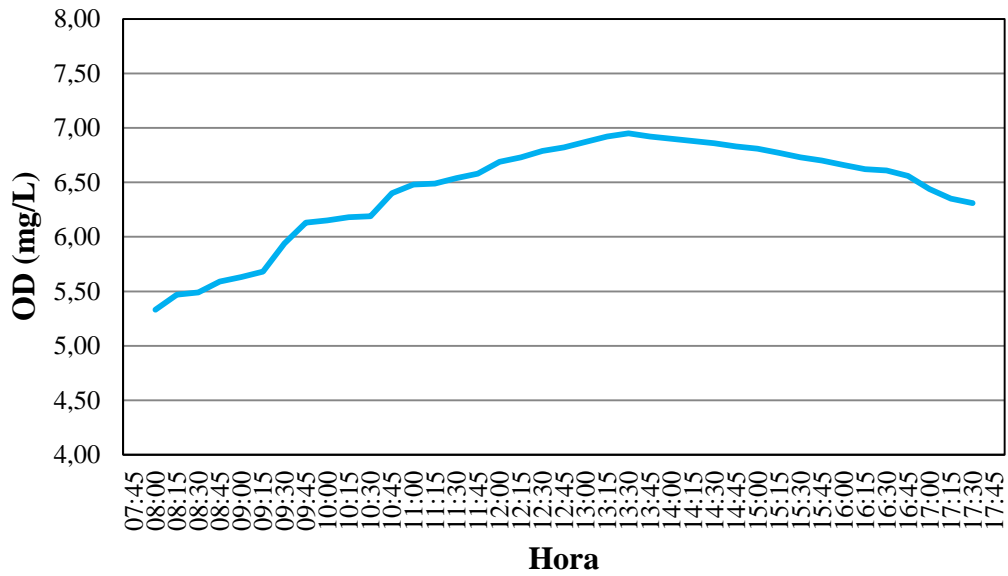


Figura 81 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 05/05/2015

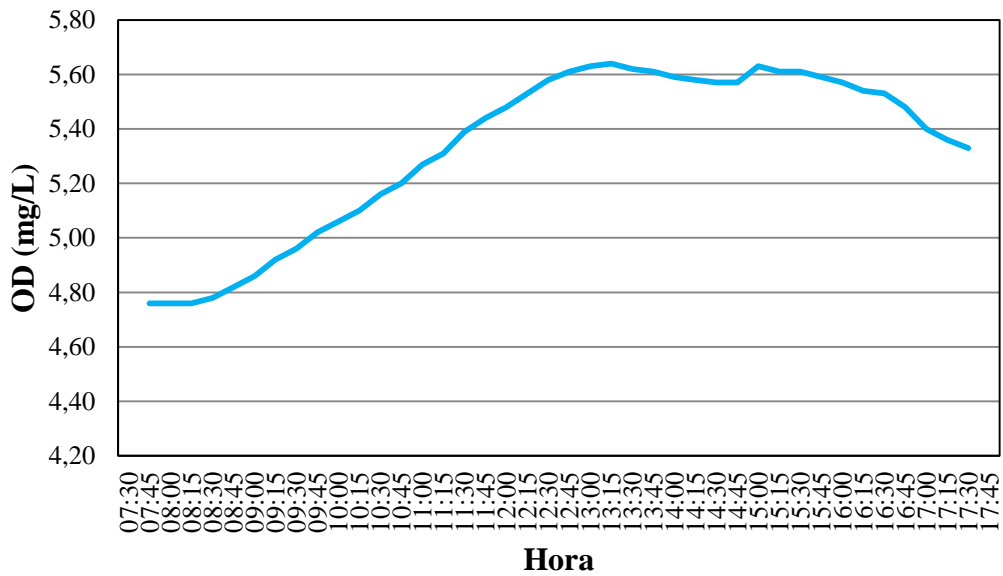


Figura 82 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 14/05/2015

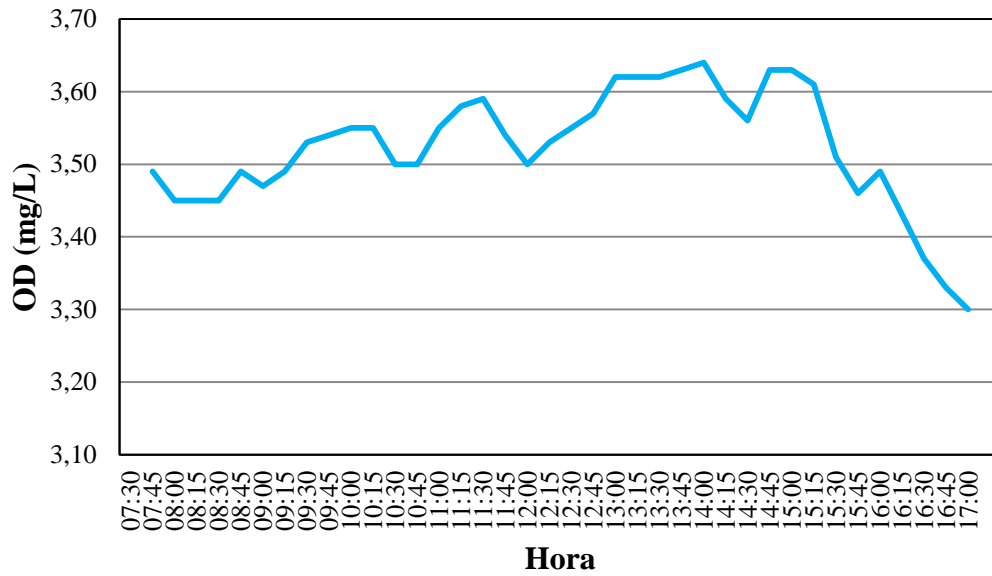


Figura 83 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 12/08/2015

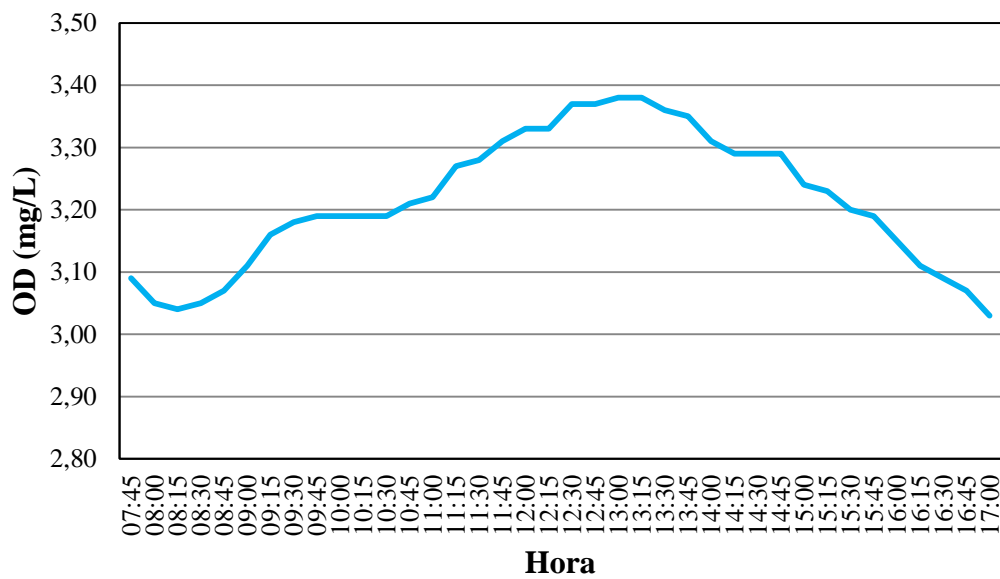
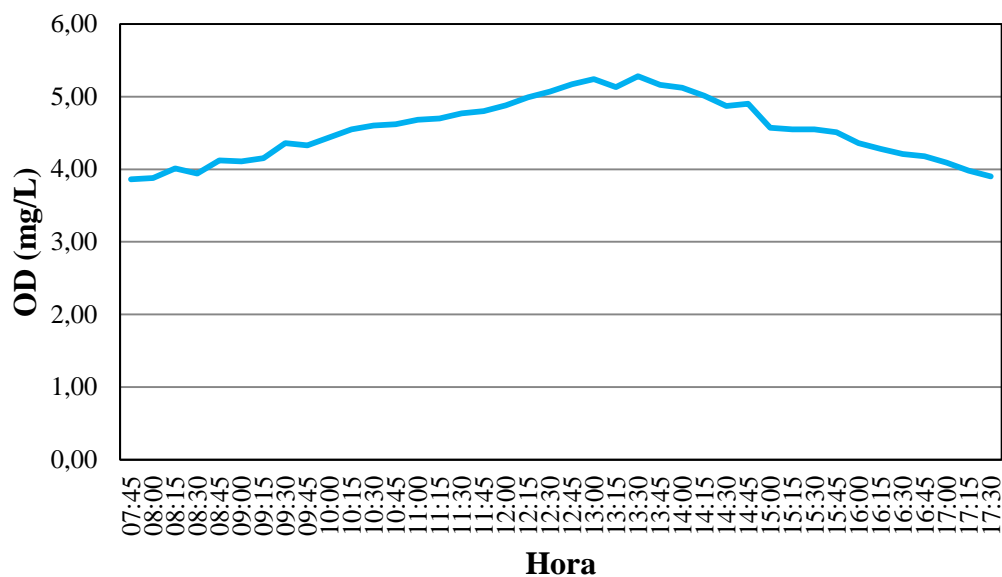


Figura 84 - Perfil de OD na bacia hidrográfica João Goulart da campanha realizada em 15/09/2015



APÊNDICE E - GRÁFICOS DO PERFIL DE OD NA BACIA HIDROGRÁFICA RSC 287

Figura 85 - Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 07/12/2015

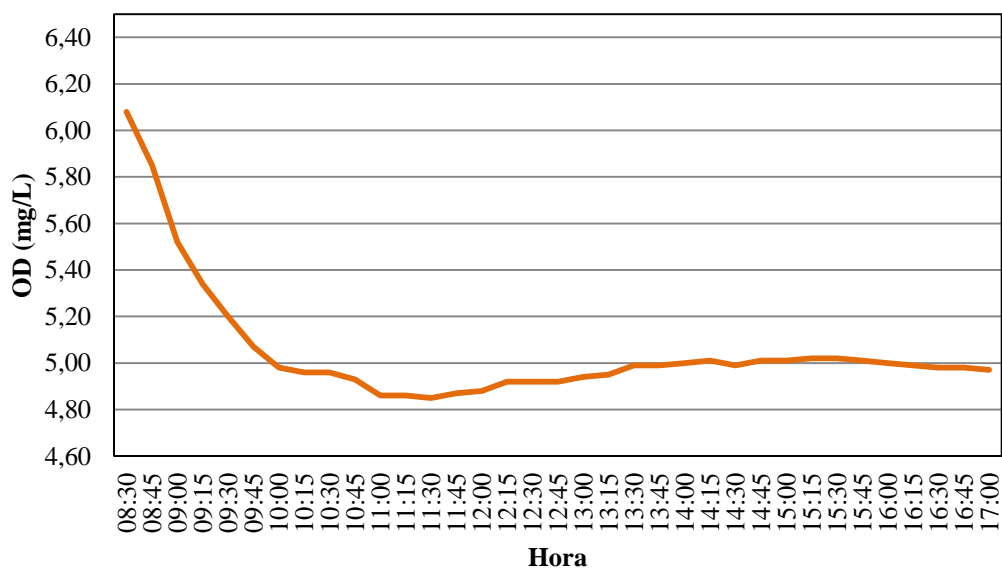


Figura 86 - Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 10/12/2015

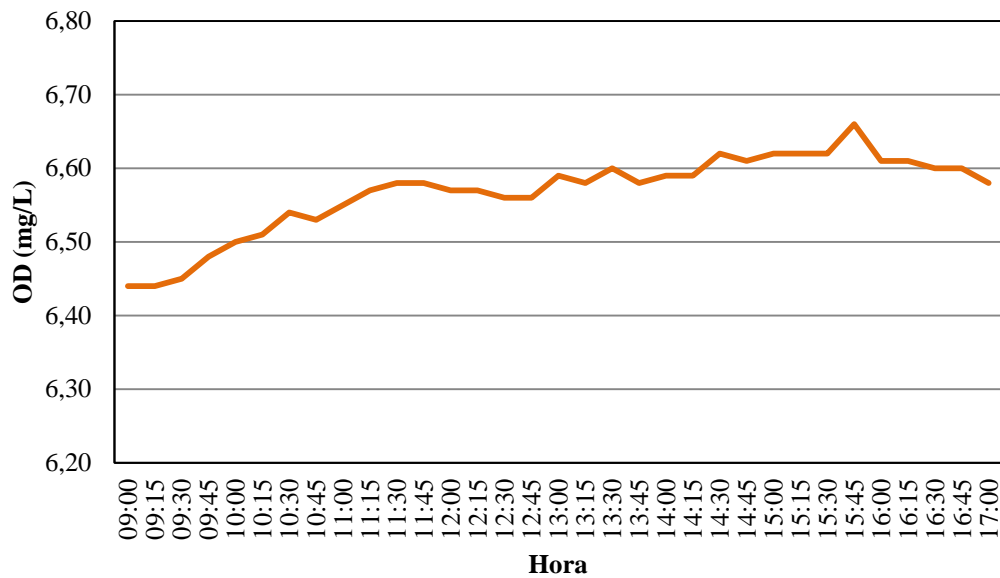
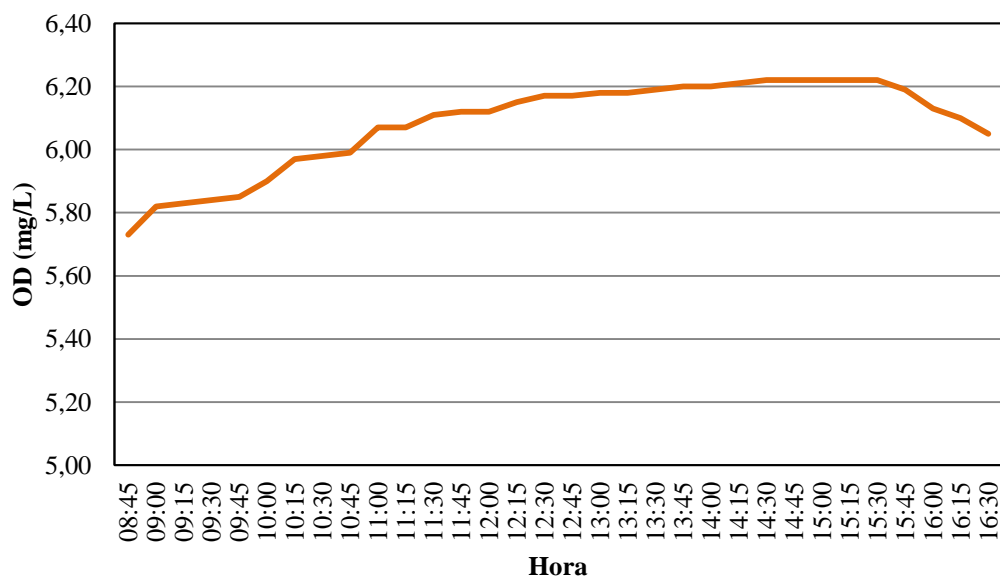


Figura 87 - Perfil de OD na bacia hidrográfica RSC 287 da campanha realizada em 21/01/2016



APÊNDICE F – DURAÇÃO DO FOTOPERÍODO, NASCER DO SOL E MEIO-DIA SOLAR NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Tabela 24 - Duração do fotoperíodo, nascer do sol e meio-dia solar na bacia hidrográfica Cancela-Tamandaí

Data da campanha	Duração do fotoperíodo (horas)	Nascer do sol (horas)	Meio-dia solar (horas)
04/11/2014	-	-	-
08/12/2014	14,00	6h27min	13h27min
03/02/2015	13,42	7h06min	13h48min
26/02/2015	12,78	6h24min	12h47min
18/03/2015	12,18	6h37min	12h42min
10/07/2015	10,35	7h30min	12h40min
23/10/2015	-	-	-

Legenda: - - dado não observado.

Tabela 25 - Duração do fotoperíodo, nascer do sol e meio-dia solar na bacia hidrográfica Menino Deus II

Data da campanha	Duração do fotoperíodo (horas)	Nascer do sol	Meio-dia solar
17/12/2014	14,05	6h30min	13h31min
12/01/2015	13,90	6h47min	13h45min
04/02/2015	13,40	7h07min	13h48min
12/02/2015	13,17	7h14min	13h48min
12/03/2015	12,35	6h34min	12h44min
20/03/2015	12,18	6h37min	12h43min
10/04/2015	11,45	6h52min	12h35min
24/04/2015	11,12	6h59min	12h32min
15/05/2015	10,63	7h12min	12h30min
01/07/2015	10,26	7h31min	12h39min
15/07/2015	10,41	7h28min	12h40min
06/08/2015	10,85	7h15min	12h40min
02/09/2015	11,55	6h48min	12h34min

Tabela 26 - Duração do fotoperíodo, nascer do sol e meio-dia solar na bacia hidrográfica Menino Deus IV

Data da campanha	Duração do fotoperíodo (horas)	Nascer do sol (horas)	Meio-dia solar (horas)
17/12/2014	14,05	6h30min	13h31min
12/01/2015	13,90	6h47min	13h45min
04/02/2015	13,40	7h07min	13h48min
12/02/2015	13,17	7h14min	13h48min
12/03/2015	12,35	6h34min	12h44min
20/03/2015	12,18	6h37min	12h43min
10/04/2015	11,45	6h52min	12h35min
24/04/2015	11,12	6h59min	12h32min
26/05/2015	10,44	7h19min	12h32min
19/06/2015	10,24	7h29min	12h36min
15/07/2015	10,41	7h28min	12h40min
06/08/2015	10,85	7h15min	12h40min
02/09/2015	11,55	6h48min	12h34min

Tabela 27 - Duração do fotoperíodo, nascer do sol e meio-dia solar na bacia hidrográfica João Goulart

Data da campanha	Duração do fotoperíodo (horas)	Nascer do sol (horas)	Meio-dia solar (horas)
18/12/2014	14,05	6h30min	13h31min
07/01/2015	13,95	6h43min	13h41min
13/01/2015	12,97	6h51min	13h20min
05/02/2015	13,37	7h08min	13h48min
03/03/2015	12,61	6h28min	12h46min
17/03/2015	12,20	6h37min	12h43min
31/03/2015	11,08	6h45min	12h39min
07/04/2015	11,58	6h49min	12h37min
14/04/2015	11,40	6h53min	12h35min
23/04/2015	11,14	6h59min	12h33min
05/05/2015	10,85	7h06min	12h31min
14/05/2015	10,63	7h12min	12h30min
16/06/2015	10,26	7h28min	12h35min
16/07/2015	10,43	7h28min	12h40min
12/08/2015	10,99	7h10min	12h39min
15/09/2015	11,92	6h32min	12h29min

Tabela 28 - Duração do fotoperíodo, nascer do sol e meio-dia solar na bacia hidrográfica RSC 287

Data da campanha	Duração do fotoperíodo (horas)	Nascer do sol (horas)	Meio-dia solar (horas)
30/09/2015	12,37	6h14min	12h24min
06/11/2015	13,41	6h36min	13h18min
07/12/2015	13,98	6h27min	13h26min
10/12/2015	14,02	6h27min	13h27min
19/01/2016	13,75	6h53min	13h45min
21/01/2016	13,73	6h54min	13h45min
01/02/2016	13,48	7h04min	13h48min

ANEXOS

ANEXO A – DADOS DE COTA, VELOCIDADE MÉDIA E PROFUNDIDADE MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA CANCELA-TAMANDAÍ

Tabela 29 - Dados de H, v e P da bacia Cancela-Tamandaí

H	v (m/s)	P (m)
0,142	0,148	0,064
0,190	0,157	0,133
0,190	0,157	0,133
0,190	0,157	0,133
0,190	0,476	0,098
0,320	0,26	0,397
0,350	0,311	0,422
0,350	0,301	0,432
0,380	0,414	0,396
0,410	0,259	0,427
0,470	0,401	0,524
0,550	0,446	0,528
1,210	0,978	0,996
1,220	0,647	0,955
1,270	0,811	1,05
1,500	1,114	1,138
1,500	1,093	1,084

Fonte: Santos (2014).

ANEXO B – DADOS DE COTA, VELOCIDADE MÉDIA E PROFUNDIDADE MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA MENINO DEUS II

Tabela 30 - Dados de H, v e P da bacia Menino Deus II

(continua)		
H	v (m/s)	P (m)
0,10	0,152	0,071
0,12	0,122	0,082
0,13	0,134	0,103
0,14	0,158	0,093
0,15	0,421	0,077
0,18	0,441	0,076
0,19	0,415	0,083
0,21	0,386	0,086
0,22	0,420	0,086
0,23	0,430	0,080

Tabela 30 - Dados de cota, velocidade média e profundidade média da bacia Menino Deus II

(conclusão)		
H	v (m/s)	P (m)
0,24	0,459	0,109
0,25	0,520	0,107
0,39	0,456	0,341
0,42	0,637	0,386
0,54	1,646	0,444
0,57	0,887	0,446
0,58	1,609	0,393
0,74	1,176	0,529
0,77	1,426	0,543
0,84	1,859	0,623
0,89	1,949	0,676
0,92	1,788	0,697
0,96	2,116	0,717

Fonte: Souza (2012)

ANEXO C - DADOS DE COTA, VELOCIDADE MÉDIA E PROFUNDIDADE MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA JOÃO GOULART

Tabela 31 - Dados de H, v e P da bacia João Goulart

H (m)	v (m/s)	P (m)
0,03	0,116	0,09
0,09	0,149	0,105
0,17	0,197	0,355
0,17	0,312	0,427
0,30	0,993	0,634
0,31	0,365	0,404
0,40	0,700	0,385
0,43	0,748	0,649
0,48	0,705	0,706
0,49	0,883	0,837
0,51	0,858	0,891
0,52	0,804	0,504
0,65	0,886	1,022
0,83	1,225	1,278
0,85	1,142	1,161
0,92	1,557	1,108

Fonte: Teixeira (2015)