

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO**

**ROGER DANIEL RÔDAS**

**Variáveis limnológicas e utilização do modelo hidrológico QUAL2Kw na  
proposição de cenários para o rio Sorocabaçu (SP).**

**VERSÃO CORRIGIDA**

**São Carlos  
2013**



**ROGER DANIEL RÔDAS**

**Variáveis limnológicas e utilização do modelo hidrológico QUAL2Kw na proposição de cenários para o rio Sorocabaçu (SP).**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientadora: Professora Titular Maria do Carmo Calijuri

São Carlos, SP

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

R685v Rôdas, Roger Daniel  
Variáveis limnológicas e utilização do modelo  
hidrológico QUAL2Kw na proposição de cenários para o  
rio Sorocabaçu (SP). / Roger Daniel Rôdas; orientadora  
Maria do Carmo Calijuri. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação  
e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2013.

1. rio Sorocabaçu. 2. qualidade de água. 3. modelo  
QUAL2Kw. 4. índice de estado trófico. I. Título.

*“Conte-me e eu esqueço.  
Mostre-me e eu apenas lembro.  
Envolve-me e eu compreendo.”*

Confúcio



## AGRADECIMENTOS

À força maior que nos rege e fortalece, independente do nome que cada pessoa ou religião determine a ela.

À minha família, em especial minha mãe Vera Lúcia Kuntzel, que além do amor e carinho sempre me incentivou a estudar e me proporcionou condições para que eu conseguisse trilhar até aqui. (Luana não esqueci de você, obrigado pela força “maninha”).

Aos meus amigos Rodrigo Soares e Andre Soares por me acolherem nos primeiros momentos em São Carlos, quando ainda estava perdido na cidade.

À Professora Maria do Carmo Calijuri pela oportunidade de trabalhar em seu grupo, pelos puxões de orelha, pela compreensão, paciência e atenção nos momentos mais críticos deste estudo.

Aos meus colegas do BIOTACE, Davi Gasparini, Simone Casali, Lorena Secchin, Rachel Rossi, Paulo Santos, Sarah Vargas pelos conselhos, pela união e simpatia em qualquer dia e horário.

Às técnicas responsáveis pelo BIOTACE Luci Queiroz e Adriana Miwa, um agradecimento mais que especial pela paciência e ajuda na fase de análise das amostras em laboratório, por tantas vezes “salvarem minha pele” quando tudo parecia perdido e é claro pelo momento do caféééééé.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos e à FAPESP, pelo auxílio financeiro aos trabalhos de campo.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) pela oportunidade de realização desta pesquisa.

Aos funcionários do SHS, em especial a Sá e a Rose, que sempre me auxiliaram com bom humor e simpatia.

Aos técnicos Waldomiro Antônio Filho (Miro) e José Roberto Maramarque (Betão) e ao motorista Benedito Patracon (Benê), pelas brincadeiras e descontração durante as coletas, pela companhia bem humorada e momentos excelentes frente à dias exaustivos, sem perder o profissionalismo.

À Juliana Moccellin, pela enorme ajuda no primeiro contato com o modelo, que foi imprescindível na etapa de calibração.

À minha companheira de pesquisa Juliana Garcia, pelas discussões construtivas durante a qualificação e lanches pra esfriar a cabeça.

À Josiane Beltrame, Eliane Mahl, Jacqueline Tenório, por me aguentar durante todas as fases deste estudo e em especial à Sabrina Castro, uma das maiores descobertas minhas neste novo trajeto, minha “irmã mais velha”.

Aos meus amigos de república e todos os agregados Osvaldo Mamprim, Matheus Arndt, Rodrigo Martins de Almeida, Nayara Falanca Davi de Andrade, Guilherme Barbosa, Leandro Alves e Arthur Rotiroti, pela convivência, companheirismo, conselhos e bons momentos durante o desenvolvimento deste estudo.

À todos aqui citados e outros que de alguma forma contribuíram não só com este estudo, mas com todas as experiências que tive nesta fase de minha vida. Muito obrigado por terem participado disso tudo, com certeza nada seria possível sem vocês.

## RESUMO

RÔDAS, R. D. **Variáveis limnológicas e utilização do modelo hidrológico QUAL2Kw na proposição de cenários para o rio Sorocabaçu (SP)**. 2013. 98p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

O reservatório de Itupararanga localizado na UGRHI-10 é principal manancial abastecedor da cidade de Sorocaba e destaca-se como o mais importante pelo seu porte e capacidade de regularização de vazão. Este reservatório tem como seus principais formadores os rios Sorocabaçu, Sorocamirim e Una e observou-se um decaimento na qualidade de sua água durante os últimos anos. Sendo assim, este estudo teve como objetivo avaliar a contribuição das principais variáveis físicas e químicas do rio Sorocabaçu para o reservatório de Itupararanga, avaliando o possível impacto no mesmo, visando fornecer subsídios para a gestão deste recurso hídrico e garantia de seus usos múltiplos. Para tanto, foram realizadas quatro campanhas de coletas durante os períodos sazonais (inverno e primavera em 2011 e verão e outono em 2012) e coletadas amostras de água e de sedimento em oito pontos diferentes do rio Sorocabaçu e um ponto do rio Sorocaba para análises físicas e químicas, calibração do modelo hidrológico QUAL2Kw, cálculo do índice de estado trófico e cálculo das cargas contribuintes. De modo geral, o rio Sorocabaçu se comportou de acordo com o “River Continuum Concept”. A partir da análise das variáveis limnológicas da água e do sedimento do rio Sorocabaçu ao longo do seu perfil longitudinal, foi possível verificar que os maiores impactos foram causados principalmente pela poluição difusa e pela planície de alagamento próxima ao ponto R-08, influenciando negativamente na qualidade da água que desemboca para o rio Sorocaba. O regime pluviométrico exerceu forte influência nesta pesquisa, com um maior input de nutrientes e sólidos nos períodos chuvosos (primavera e verão). Os resultados demonstraram que o rio Sorocabaçu se adequou aos valores limites estabelecidos pela resolução CONAMA 430/2011 para rios de Classe 2. Porém, o mesmo não aconteceu para índices mais restritivos de nitrogênio total e fósforo total, sugeridos para rios do estado de São Paulo. O modelo QUAL2Kw foi calibrado com os dados obtidos nas coletas e foram propostos cenários com quadros positivos e negativos em relação a contribuição difusa no rio Sorocabaçu para a população de 2012, 2022 e 2032. O processo de autodepuração do rio Sorocabaçu não suportará o crescimento planejado para o município de

Ibiúna sem que haja a implantação de políticas novas mitigadoras da poluição difusa desta região. De acordo com o cálculo do índice de estado trófico, o rio Sorocabuçu foi classificado como mesotrófico. A contribuição deste manancial foi de, pelo menos, 25% das cargas de nutrientes e sólidos suspensos totais que entraram no rio Sorocaba e, conseqüentemente, no reservatório de Itupararanga no período estudado. Portanto, a gestão deste sistema aquático é de grande importância para a manutenção e controle dos impactos gerados a partir de sua foz.

**Palavras-chave:** rio Sorocabuçu; qualidade de água; Modelo QUAL2Kw; índice de estado trófico.

## ABSTRACT

RÔDAS, R. D. **Limnological variables and utilization of the hydrologic model QUAL2Kw in propositions of different scenarios for Sorocabuçu river (SP)**. 2013. 98p. Dissertation (Master's Degree). School of Engineering in São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2013.

The Itupararanga reservoir, located in UGRH-10 is the main water supplier for Sorocaba city and stands out as the most importante by size and ability to regulate the flow. This reservoir is formed by the rivers Sorocabuçu, Sorocamirim and Una, in the last years has seen a reduction in the quality of this water. Thus, the study aimed to evaluate the contribution of the main physical and chemical parameters of Sorocabuçu river to Itupararanga reservoir, assessing the possible impact of the same, to provide input for the management of water sources and ensuring its multiple uses. Therefore, there were four sampling campaigns during seasonal periods (winter and spring 2011 and summer and autumn in 2012) to collect samples of water and sediment in eight different points of the river Sorocabuçu and one point of Sorocaba river for physical and chemical analysis, calibration of the hydrological model QUAL2Kw, calculation of the trophic state index and load calculation inputs. Generally the river Sorocabuçu behaved in accordance with the River Continuum Concept. From the analysis of limnological behavior of water and sediment of the river Sorocabuçu along its longitudinal profile, we found that the greatest impacts were mainly caused by diffuse pollution and the floodplain influences near the point R-08, causing negative results in the water quality that flows into the river Sorocaba. The rainfall had a strong influence on this research with a greater input of nutrients and solids in rainy periods (spring and summer). The results showed that the river Sorocabuçu adapted itself to limits established by CONAMA 430/2011 for Class 2 rivers. But the same does not happen to more restrictive levels of total nitrogen and total phosphorus, as suggested to São Paulo state rivers. QUAL2Kw model was calibrated with data collected of the sample campaigns, then were proposed different scenarios with positive and negative frames over diffuse contribution on the river Sorocabuçu for the population estimated to 2012, 2022 and 2032. The process of autodepuration of the river Sorocabuçu not sustains the growth planned for the city of Ibiúna without the implementation of new policies mitigating diffuse pollution in this region. According to the calculation of the trophic state index the river Sorocabuçu was classified as mesotrophic. This source contribution was at

least 25% of the loads of nutrients and solids that entered the Sorocaba River and consequently the reservoir Itupararanga in the studied period. Therefore the management of aquatic systems is of great importance for the maintenance and control of impacts generated from its outfall.

**Keywords:** Sorocabuçu river; water quality; QUAL2Kw model; trophic state index.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Esquema de segmentação do software QUAL2K em trechos. Adaptado de CHAPRA, PELLETIER; TAO , 2008.....  | 11 |
| Figura 2 - Divisão de um trecho em 4 elementos de comprimentos iguais. Adaptado de Chapra, Pelletier e Tao, 2008. ....   | 11 |
| Figura 3 – Localização da sub-bacia e rio em estudo no espaço territorial brasileiro. Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2008) – modificado pelo autor. ....                        | 16 |
| Figura 4 - Nivel de atendimento de tratamento de esgoto sanitário na área urbana para o município de Ibiúna. (SEADE,2011). ....  | 18 |
| Figura 5 - Pontos de coleta pré selecionados para amostragem no rio Sorocabuçu (SP).....   | 19 |
| Figura 6 - Fotos dos pontos de amostragens do rio Sorocabuçu. ....   | 22 |
| Figura 7 - Fotos do ponto de amostragem do rio Sorocaba.....   | 23 |
| Figura 8 - Diagrama unifilar do trecho simulado do rio Sorocabuçu, indicando o posicionamento dos pontos de amostragens e os trechos e elementos que recebem poluição difusa. ....                 | 28 |
| Figura 9 - Vazão ( $m^3.s^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....  | 32 |
| Figura 10 – Temperaturas médias mensais, máximase mínimas do ar ( $^{\circ}C$ ) próxima ao município de Sorocaba.Fonte: CIIAGRO. ....  | 33 |
| Figura 11 - Dados médios de precipitação mensal (mm) na bacia do rio Sorocabuçu no período 2004-2012. (Fonte: DAEE/CTH).....   | 34 |
| Figura 12- Dados de precipitação total mensal (mm) na bacia do rio Sorocabuçu no período das coletas. (Fonte: DAEE/CTH).....   | 34 |
| Figura 13 – Dados diários de precipitação (mm) da bacia do rio Sorocabuçu durante a data de cada coleta e nos cinco dias anteriores no Inverno, Primavera, Verão e Outono. (Fonte: DAEE/CTH). .... | 35 |
| Figura 14 - Temperatura da água ( $^{\circ}C$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.....   | 36 |
| Figura 15 - pH nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....   | 37 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 16 - Alcalinidade ( $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....                                     | 38 |
| Figura 17 - Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....                              | 39 |
| Figura 18 - Sólidos suspensos totais ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....                               | 40 |
| Figura 19 - Relação entre sólidos suspensos orgânicos e inorgânicos com sólidos suspensos totais (%) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. .... | 41 |
| Figura 20 - Turbidez (uT) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....  | 42 |
| Figura 21 - Oxigênio dissolvido ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....                                    | 44 |
| Figura 22 - Fósforo total ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....  | 45 |
| Figura 23 - Fósforo total dissolvido ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....                             | 46 |
| Figura 24 - Ortofosfato ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....  | 47 |
| Figura 25 - Nitrogênio total Kjeldahl ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....                              | 48 |
| Figura 26 - Nitrito ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....  | 49 |
| Figura 27 - Nitrato ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....  | 50 |
| Figura 28 - Carbono total ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....  | 51 |
| Figura 29 - Relação entre carbono orgânico e inorgânico com carbono total (%) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....                        | 52 |
| Figura 30 - Clorofila- <i>a</i> ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....                                  | 53 |
| Figura 31 - Feofitina ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono. ....  | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 32 - Fósforo do sedimento ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.....                               | 56 |
| Figura 33 - Nitrogênio do sedimento ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.....                              | 57 |
| Figura 34 - Matéria orgânica do sedimento (%) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.....   | 58 |
| Figura 35 - Curva de calibração da concentração de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de inverno de 2011 no rio Sorocabuçu. ....         | 60 |
| Figura 36 - Curva de calibração da concentração de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de inverno de 2011 no rio Sorocabuçu.....             | 60 |
| Figura 37 - Curva de calibração da concentração de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de inverno de 2011 no rio Sorocabuçu. ....        | 61 |
| Figura 38 - Curva de calibração da concentração de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de inverno de 2011 no rio Sorocabuçu. ....   | 61 |
| Figura 39 - Curva de calibração da concentração de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de primavera de 2011 no rio Sorocabuçu. ....       | 62 |
| Figura 40 - Curva de calibração da concentração de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de primavera de 2011 no rio Sorocabuçu.....           | 63 |
| Figura 41 - Curva de calibração da concentração de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de primavera de 2011 no rio Sorocabuçu. ....      | 63 |
| Figura 42 - Curva de calibração da concentração de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de primavera de 2011 no rio Sorocabuçu. .... | 64 |
| Figura 43 - Curva de calibração da concentração de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de verão de 2012 no rio Sorocabuçu.....            | 65 |
| Figura 44 - Curva de calibração da concentração de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de verão de 2012 no rio Sorocabuçu. ....              | 65 |
| Figura 45 - Curva de calibração da concentração de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de verão de 2012 no rio Sorocabuçu.....           | 66 |
| Figura 46 - Curva de calibração da concentração de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de verão de 2012 no rio Sorocabuçu. ....     | 66 |
| Figura 47 - Curva de calibração da concentração de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de outono de 2012 no rio Sorocabuçu.....           | 67 |
| Figura 48 - Curva de calibração da concentração de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de outono de 2012 no rio Sorocabuçu.....              | 68 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 49 - Curva de calibração da concentração de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de outono de 2012 no rio Sorocabuçu. ....      | 68 |
| Figura 50 - Curva de calibração da concentração de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de outono de 2012 no rio Sorocabuçu. .... | 69 |
| Figura 51 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o inverno no rio Sorocabuçu. ....             | 73 |
| Figura 52 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o inverno no rio Sorocabuçu. ....                | 74 |
| Figura 53 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o inverno no rio Sorocabuçu. ....            | 74 |
| Figura 54 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o inverno no rio Sorocabuçu. ....       | 75 |
| Figura 55 - Resultados das simulações dos cenários propostos para os índices de estado trófico durante o inverno no rio Sorocabuçu. ....  | 75 |
| Figura 56 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante a primavera no rio Sorocabuçu. ....           | 77 |
| Figura 57 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante a primavera no rio Sorocabuçu. ....              | 77 |
| Figura 58 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante a primavera no rio Sorocabuçu. ....          | 78 |
| Figura 59 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de sólidos suspensos totais. ....  | 78 |
| Figura 60 - Resultados das simulações dos cenários propostos para os índices de estado trófico durante a primavera no rio Sorocabuçu. ....  | 79 |
| Figura 61 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o verão no rio Sorocabuçu. ....               | 81 |
| Figura 62 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o verão no rio Sorocabuçu. ....                  | 81 |
| Figura 63 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o verão no rio Sorocabuçu. ....              | 82 |
| Figura 64 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o verão no rio Sorocabuçu. ....         | 82 |
| Figura 65 - Resultados das simulações dos cenários propostos para os índices de estado trófico durante o verão no rio Sorocabuçu. ....  | 83 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 66 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o outono no rio Sorocabaçu.....        | 85 |
| Figura 67 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o outono no rio Sorocabaçu. ....          | 85 |
| Figura 68 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o outono no rio Sorocabaçu. ....      | 86 |
| Figura 69 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o outono no rio Sorocabaçu. .... | 86 |
| Figura 70 - Resultados das simulações dos cenários propostos para os índices de estado trófico durante o outono no rio Sorocabaçu. ....  | 87 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 -Classificação do Estado Trófico para rios utilizada pela CETESB segundo Índice de Carlson modificado. Fonte: CETESB 2011. ....   | 14 |
| Tabela 2- Variáveis físicas e químicas a serem analisadas e os respectivos métodos e referências utilizados.....   | 24 |
| Tabela 3- Valores médios de contribuição difusa estimados pelo autor para calibração do modelo QUAL2Kw.....  | 70 |
| Tabela 4 – Vazões e cargas de contribuição de carbono total, nitrogênio total, fósforo total e sólidos suspensos totais dos pontos de coleta R-07 (rio Sorocabuçu), R-09(rio Sorocaba) e do estudo de Cunha (2012). ....   | 89 |
| Tabela 5 – Relação entre os pontos de coleta do rio Sorocabuçu (R-07) e rio Sorocaba (R-09) nos diferentes períodos sazonais. A vazão, as cargas de carbono total, nitrogênio total, fósforo total e sólidos suspensos totais representando a contribuição do rio Sorocabuçu ao Sorocaba estão expressas em %..... | 90 |

## SUMÁRIO

|   |       |
|---|-------|
| RESUMO .....  | IX    |
| ABSTRACT .....  | XI    |
| LISTA DE FIGURAS .....  | XIII  |
| LISTA DE TABELAS .....  | XVIII |
| 1 INTRODUÇÃO.....   | 1     |
| 2 OBJETIVOS.....  | 3     |
| REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 4     |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS.....   | 15    |
| 3.1    Área de estudo .....   | 15    |
| 3.1.1    Pontos de amostragem .....   | 18    |
| 3.2    Variáveis hidráulicas .....  | 23    |
| 3.3    Variáveis climatológicas .....   | 23    |
| 3.4    Variáveis físicas e químicas da água .....   | 24    |
| 3.5    Variáveis biológicas da água.....  | 25    |
| 3.1    Variáveis físicas e químicas do sedimento .....  | 25    |
| 3.1    Cálculo do índice de estado trófico .....  | 25    |
| 3.2    Utilização do modelo QUAL2Kw e simulação de cenários .....   | 25    |
| 3.3    Cálculo das cargas de nutrientes e sólidos do rio Sorocabaçu e Sorocaba para os pontos de coleta. .... | 30    |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....  | 31    |
| 4.1    Variáveis hidráulicas e climatológicas .....   | 31    |
| 4.1.1    Vazão .....  | 31    |
| 4.1.2    Temperatura do ar.....   | 32    |
| 4.1.3    Precipitação pluviométrica .....   | 33    |
| 4.2    Variáveis físicas e químicas da água .....   | 35    |
| 4.2.1    Temperatura da água .....  | 35    |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 4.2.1   | Potencial hidrogeniônico .....  | 36 |
| 4.2.1   | Alcalinidade .....  | 37 |
| 4.2.1   | Condutividade elétrica .....  | 38 |
| 4.2.1   | Sólidos suspensos totais .....  | 40 |
| 4.2.1   | Turbidez.....   | 41 |
| 4.2.1   | Oxigênio dissolvido .....   | 43 |
| 4.2.2   | Série fosfatada .....   | 44 |
| 4.2.3   | Série nitrogenada.....  | 47 |
| 4.2.4   | Carbono total .....   | 50 |
| 4.3     | Variáveis biológicas da água .....  | 52 |
| 4.3.1   | Clorofila- <i>a</i> e feofitina .....   | 52 |
| 4.4     | Resultados da análise dos sedimentos do rio Sorocabuçu .....  | 54 |
| 4.4.1   | Fósforo do sedimento .....  | 55 |
| 4.4.2   | Nitrogênio do sedimento .....   | 56 |
| 4.4.3   | Matéria orgânica do sedimento.....  | 57 |
| 4.5     | Calibração do modelo QUAL2Kw para o rio Sorocabuçu.....   | 59 |
| 4.5.1.1 | Calibração das variáveis referente a coleta de inverno (29 de julho de 2011) ...                                | 59 |
| 4.5.1.1 | Calibração das variáveis referentes a coleta de primavera (18 de outubro de 2011)                               | 62 |
| 4.5.1.2 | Calibração das variáveis referentes a coleta de verão (08 de fevereiro de 2012)                                 | 64 |
| 4.5.1.3 | Calibração das variáveis referentes a coleta de outono (18 de abril de 2012) ...                                | 67 |
| 4.5.1.4 | Discussão geral da calibração dos cenários .....  | 69 |
| 4.5.2   | Apresentação dos cenários propostos para o rio Sorocabuçu e os seus respectivos índices de estado trófico ..... | 71 |
| 4.5.2.1 | Cenários propostos para o inverno no rio Sorocabuçu .....   | 72 |
| 4.5.2.2 | Cenários propostos para a primavera no rio Sorocabuçu .....   | 76 |
| 4.5.2.3 | Cenários propostos para o verão no rio Sorocabuçu. ....   | 79 |
| 4.5.2.4 | Cenários propostos para o outono no rio Sorocabuçu.....   | 83 |
| 4.5.2.1 | Discussão Geral dos Cenários Propostos. ....  | 87 |
| 4.6     | Contribuição do rio Sorocabuçu em cargas de nutrientes e sólidos suspensos totais para o rio Sorocaba .....     | 89 |
| 5       | CONCLUSÕES .....  | 91 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 6 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES ..... | 93 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 94 |



# 1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento vital à natureza e sua disponibilidade para uso humano pode ser o principal parâmetro de sustentabilidade de uma determinada comunidade e espaço territorial. De diferentes modos, presta-se a múltiplos usos, como para abastecimento doméstico e industrial, irrigação de culturas agrícolas, aquíicultura, pesca, recreação, geração de energia elétrica e como receptora de efluentes.

Para cada uso deste recurso existe a necessidade de que suas características qualitativas atendam a diferentes padrões. Os corpos de águas superficiais são dotados de um processo natural para assimilação de poluentes, porém esta capacidade é limitada e a quantidade de carga poluidora inserida no mesmo não deve vir a degradar sua qualidade e comprometer seu uso.

A água é abundante em grande parte do território brasileiro, mas ainda existem áreas carentes a ponto de transformá-la em um bem limitado às necessidades do homem. Segundo Moita e Cudo (1991), as situações de escassez mais graves ocorrem normalmente em regiões que tiveram um desenvolvimento desordenado, provocando a deterioração das águas disponíveis, devido ao lançamento indiscriminado de esgotos domésticos, despejos industriais, agrotóxicos e outros poluentes.

Para que seu uso seja aproveitado da melhor forma possível, a Gestão de Recursos Hídricos surgiu na pretensão de equacionar e resolver as questões de escassez relativa dos recursos hídricos, bem como fazer o uso adequado, visando a otimização desses recursos em benefício da sociedade (ANA, 2001).

Para a implementação de um sistema de gestão ambiental é necessária a delimitação de uma unidade geográfica. Segundo BOTTINO (2008), uma bacia hidrográfica considerada como unidade de estudo, apresenta inúmeras características fundamentais, com destaque nas interações entre os seus principais componentes, desde abióticos (como clima e relevo, por exemplo) e bióticos (comunidade de plantas e animais), até a interação do homem e o impacto de suas atividades na qualidade da água. Destaca-se, portanto, a importância da adoção do conceito da bacia hidrográfica como recorte físico-territorial básico para o gerenciamento dos recursos hídricos.

O rio Sorocabuçu situa-se dentro do espaço territorial do município de Ibiúna, na sub-bacia do Alto Sorocaba e, segundo o estudo de SARDINHA et. al. (2008b) nesta mesma bacia, a ausência de tratamento adequado para os efluentes domésticos no município de Ibiúna e as intensas atividades agrícolas da região reduzem a qualidade da água que desemboca no Reservatório de Itupararanga, aumentando seu processo de eutrofização.

A partir da caracterização ambiental do rio Sorocabuçu em escala sazonal, da avaliação dos impactos das atividades que estão inseridas durante seu percurso e da sua capacidade de assimilação de cargas poluidoras, foi possível a calibração e validação do modelo hidrológico QUAL2Kw, além da realização de simulações de cenários de forma a auxiliar na implantação de um sistema de gestão no manancial.

## 2 OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo principal, com base nas teorias ecológicas de ecossistemas fluviais, avaliar o provável impacto que a qualidade da água e sedimento do rio Sorocaba pode causar no reservatório de Itupararanga, visando fornecer subsídios para a gestão desse recurso hídrico e garantia de seus usos múltiplos. Para alcançar este objetivo, esta pesquisa está fundamentada:

- No estudo do comportamento das variáveis limnológicas da água do rio Sorocaba – SP em quatro períodos hidrológicos distintos;
- Na caracterização do sedimento (nutrientes e matéria orgânica) do rio Sorocaba, em quatro períodos hidrológicos distintos;
- Na calibração (ajuste) e validação (verificação) do modelo hidrológico QUAL2Kw, seguida da realização de simulações de diferentes cenários ambientais para o rio Sorocaba;
- Verificar a contribuição deste manancial para o índice de estado trófico (IET) do reservatório de Itupararanga.
- Verificar a contribuição das cargas de nitrogênio, fósforo, carbono e sólidos totais do rio Sorocaba para o rio Sorocaba, no período de 2010-2011.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A produção de riqueza, entendida como a capacidade da sociedade de dispor dos bens considerados indispensáveis ao homem civilizado, tornou-se indicador do grau de desenvolvimento e, a partir de então, os esforços foram destinados ao incremento crescente de meios capazes de elevar os níveis de crescimento econômico (AGRA, 2013). O desenvolvimento científico e tecnológico propicia processos crescentes e intensos de transformação da natureza, uma vez que são criadas novas necessidades de uso da água pelo Homem a partir de suas necessidades sociais, não sendo mais esta interpretada somente como elemento natural necessário à manutenção e reprodução da vida (FRACALANZA, 2005).

Observam-se então muitos conflitos a respeito do uso da água e como geri-la. A Lei nº 9.433 de oito de janeiro de 1997 institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e define, entre seus fundamentos, que a água é um bem de domínio público, dotado de valor econômico, com uso prioritário para consumo humano e dessedentação de animais e que sua gestão deve proporcionar seus usos múltiplos. De acordo com SETTI e colaboradores (2001), para obter a mínima degradação ambiental e máximos benefícios econômicos e sociais, o planejamento dos recursos hídricos visa à avaliação prospectiva das demandas e das disponibilidades desses recursos e a sua alocação entre os usos múltiplos. AGRA (2013) caracteriza gestão ambiental como a “harmonização de conflitos de interesses sociais quanto às destinações dos recursos naturais e quanto aos requisitos para assegurar a manutenção das condições ambientais para a qualidade de vida da sociedade e outras formas de vida”. A mesma lei citada acima definiu também que esta gestão deve ser descentralizada - com a participação do poder público, dos usuários e das comunidades – e que a unidade territorial básica a ser utilizada nessa política é a bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água advinda da precipitação que converge os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório (TUCCI, 2009). De acordo com Calijuri e Bubel (2006), os solos e a vegetação influenciam na velocidade com que essa água alcança o rio, na natureza de seu substrato, nos processos erosivos e no potencial de produtividade da área. Sendo assim, o rio é produto integrado à bacia hidrográfica e deve ser visto como parte de uma rede de drenagem e elo para entender o comportamento de outros elementos do sistema.

Em um ecossistema lótico (rios e riachos), do ponto de vista hidrológico, a água faz o transporte permanente de substâncias em solução e também insolúveis de montante a jusante, como um sistema aberto (SILVA, 2009), respondendo a mudanças climáticas e temporais e com uma estrutura tridimensional (longitudinal, lateral e vertical). Os rios são caracterizados por processos hidrológicos e geomorfológicos altamente dinâmicos, ou seja, eles refletem (em escalas espacial e temporal) a totalidade dos processos hidrológicos, geomórficos e biológicos dos compartimentos que drenam (CALIJURI; BUBEL, 2006). De acordo com as mesmas autoras (op. cit., p. 52),

[...] os estudos em ecossistemas lóticos visam a entender os processos que governam o movimento e as transformações de energia e materiais dentro dos diferentes sistemas. As teorias ecológicas, por sua vez, tentam construir estrutura sintética para descrever o ecossistema lótico da nascente à foz e ajustar as variações entre áreas com diferentes cenários.

A partir do século XX, alguns pesquisadores formularam teorias ecológicas para compreensão mais preditiva do que simplesmente descritiva dos sistemas lóticos e as combinações interdependentes das paisagens aquáticas e terrestres. Essas teorias não são necessariamente excludentes, elas servem para direcionar o modo de observar o sistema lótico e a sua bacia hidrográfica, sendo que algumas apresentam características complementares às outras.

A teoria reconhecida como pioneira é a apresentada por Vannote e colaboradores (1980), chamada de *River Continuum Concept* (RCC), foi desenvolvida para ecossistemas lóticos que não sofreram interferência antrópica, apresentando uma série de gradientes físicos que formam um contínuo ao longo de seu curso, juntamente com a reestruturação da comunidade biótica que distribui a utilização dos insumos energéticos visando o aproveitamento total e uniforme deste fluxo de energia durante o ano.

As comunidades “rio abaixo” seriam condicionadas a desenvolver estratégias envolvendo o consumo mínimo de energia para compensar os processos ineficientes “rio acima” e o mesmo passaria de heterotrófico para autotrófico ao longo de seu curso. Neste conceito, os rios foram divididos de acordo com suas ordens de classificação em três regiões geomórficas distintas. As **cabeceiras** apresentam ordens de 1 a 3 e dependem altamente das contribuições terrestres de material orgânico, uma vez que a vegetação ripária influencia a produção autotrófica por causa de seu sombreamento. A razão produção/respiração é inferior a 1, o substrato é composto por pedras e cascalhos e a temperatura da água apresenta baixa

variação sazonal. Conforme o tamanho do fluxo aumenta, a redução da importância deste *input* de material orgânico terrestre faz um balanço com a maior importância da produção primária e o transporte orgânico. Esses processos de transferência caracterizam o **médio curso** ou região intermediária (ordens 4 a 6), onde a produção passa a ser maior que a respiração, a sedimentação pode ser igual à remoção de nutrientes e de matéria do substrato e a variação de temperatura e das condições hidráulicas propicia alta diversidade biológica. Nos rios de ordens superiores a 6 (classificados como **baixo curso**), o aumento no volume de água causa o tamponamento no rio, reduzindo as variações na temperatura e no fluxo. A razão respiração/produção volta a ser inferior a 1 devido ao aumento da turbidez. Nesta região também ocorre a deposição constante de sedimento no delta ou estuário (CALIJURI; BUBEL, 2006).

A partir da teoria de Vannote surgiu o conceito da Espiral de Nutrientes (*Nutrient Spiralling*). Criado por Elwood e colaboradores (1983), o *Nutrient Spiralling* considera a concentração de nutrientes em sua forma inorgânica dissolvida, estocada em organismos e detritos durante o transporte horizontal na coluna de água, ocorrendo assim um padrão em forma de espirais nas concentrações de nutrientes. Tal resultado é observado em outra pesquisa desenvolvida por Newbold e colaboradores (1983), que estudou o conceito em uma região arborizada do Tennessee - EUA (rio *Walker Branch*) e apresentou as dinâmicas da concentração de fósforo em forma de espirais durante o percurso do rio.

A Teoria do Descontínuo Serial ou *Serial Discontinuity Concept* (SDC) elaborada por Ward e Stanford (1983) é outro corolário do RCC que sugere um rompimento do gradiente do rio. Este conceito admite os conceitos da Espiral de Nutrientes e que a bacia hidrográfica e sua malha hídrica estão livres de quaisquer poluições e distúrbios antrópicos. O rompimento que ocorre a partir do represamento do fluxo de água e o comprimento até onde ocorrem as interferências bióticas e abióticas no eixo longitudinal do rio a partir deste ponto é chamado de “distância da descontinuidade”; desta forma, a posição em que se encontra o represamento é de grande influência na determinação das características do trecho à jusante. Em 1995, os autores (op. cit.) estenderam este conceito, passando a considerar as interações entre o rio e sua superfície de inundação e a caracterizar alguns padrões de acordo com as curvaturas apresentadas pelo rio de montante à jusante, podendo ser livre de curvas, trançado ou meândrico.

Junk, Bayley e Sparks (1989) apresentaram um conceito que possui uma visão diferenciada em relação ao fator de maior importância hidrológica em bacias de drenagem que não sofrem influência antrópica, sendo essas as lagoas de inundação. Para estes autores (op.

cit.), o pulso de inundação é a principal força responsável pela existência, produtividade e interação com a biota em sistemas de rios de maiores vazões situados em regiões de climas tropicais e que a posição longitudinal da planície de alagamento na rede de drenagem não é um fator de importância à respeito da biota. O conceito foi expandido para áreas de clima temperado no estudo de Tockner, Malard e Ward (2000), com foco na importância da temperatura e seu caráter determinante na ecologia em pulsos de inundação.

Buscando uma abordagem holística a respeito da dinâmica e natureza hierárquica dos sistemas lóticos, Ward (1989) conceitualizou estes ecossistemas em quatro dimensões ou o chamado Conceito das Quatro Dimensões (*Four Dimensions Concept*), que apresenta cada uma das dimensões e exemplifica as suas interações com o meio ambiente separadamente, demonstrando que não dependem umas das outras para que seja feita uma análise do sistema. São elas: i) dimensão longitudinal, caracterizada pelas interações que ocorrem entre a nascente e a foz (rio acima, rio abaixo); ii) dimensão lateral, que inclui interações entre o canal e o sistema ripário e de planícies de inundação; iii) dimensão vertical, representada pelas interações entre o canal e as suas águas subterrâneas contíguas; iv) quarta dimensão, sendo a influência do tempo sobre os processos, fornecendo a escala temporal.

O Conceito do Processo de Domínio (*Process Domain Concept*) foi proposto por Montgomery (1999) como uma alternativa ao Conceito do Contínuo Fluvial. De maneira ampla, o Conceito de Domínios de Processos é uma hipótese multi-escalar em que a variabilidade espacial dos processos geomorfológicos é responsável pelos distúrbios que influenciam na estrutura e na dinâmica do ecossistema. A partir de dados sobre clima regional, geologia local, vegetação e topográfica é possível fazer a classificação do fluxo de canal e a identificação de diferentes domínios geomorfológicos (fortemente ligados aos seus contextos históricos). As áreas que apresentam geologia e topografias semelhantes definem unidades litóticas, facilitando a estratificação dos perfis de processos geomorfológicos existentes no ambiente. Este conceito fornece uma base para aplicação de conceitos dinâmicos para ambientes complexos e contexto para abordar os efeitos dos processos de bacias na ecologia das bacias de drenagens de montanhas.

Thorp, Thoms e Delong (2006) propuseram um modelo heurístico de biocomplexidade lítica em escalas espaço-temporais de rios de cabeceira à rios grandes utilizando modelos aquáticos referentes ao período de 1980 a 2004. Este conceito é conhecido como *Riverine Ecosystem Synthesis* (RES) e é alternativo ao *River Continuum Concept*. O RES retrata os rios com diferentes zonas de processos funcionais formados por mosaicos de diferentes domínios, definidos de acordo com as características hidrogeomorfológicas de cada sistema aquático, e

são estipulados através de técnicas geomorfológicas. Desta maneira, estes autores incluíram 14 princípios em sua pesquisa, apresentando hipóteses testáveis de como os padrões de distribuição das espécies individuais, a regulamentação das comunidades, processos ecossistêmicos lóticos e interação de várzea variam em escalas espaço-temporais, especialmente no que diz respeito às zonas de processos funcionais citadas anteriormente.

Segundo Lima e Zakia (2006), a utilização da microbacia como unidade de estudos recebe destaque por sua maior sensibilidade à influência de fatores na geração do deflúvio (chuvas intensas, cobertura vegetal e geomorfologia). Cada bacia é formada por um conjunto de microbacias e, de acordo com o conceito de microbacias sobrepostas, a eficácia do manejo da qualidade da água será maior à medida que enfocarmos as bacias de escalas menores para maiores (CALIJURI; BUBEL, 2006). Assim, com a restauração, conservação e manutenção dos recursos hídricos, bem como com o estabelecimento de uma política consistente de manejo sustentável, com base na estratégia de manejo das microbacias hidrográficas, procura-se passar das condições existentes de contínua degradação, para condições ambientalmente desejáveis (LIMA; ZAKIA, 2006).

A introdução de matéria orgânica em um corpo de água resulta, indiretamente, no decréscimo da concentração de oxigênio dissolvido e tem diversas implicações sob o ponto de vista ambiental, sendo um dos principais problemas de poluição das águas (VON SPERLING, 1996). O autor (op. cit.) vincula o fenômeno chamado de autodepuração ao restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, por mecanismos essencialmente naturais, após as alterações induzidas pelos despejos de efluentes.

Os ecossistemas possuem certa estabilidade de resistência diante do “estresse” causado por atividades antrópicas e uma capacidade de recuperar-se através de processos ecológicos como autodepuração. As zonas onde esse processo ocorre demonstram como os ecossistemas reagem frente ao lançamento de resíduos orgânicos em um corpo de água (BENASSI, 2002). De acordo com Von Sperling (1996), uma água é considerada depurada quando suas características não são mais conflitantes com a sua utilização prevista em cada trecho do curso de água.

As variações espaciais nas características da água, que em geral diferenciam os rios ou sistemas aquáticos, são um reflexo direto das características hidrodinâmicas que ocorrem no ambiente. A inspeção de um corpo de água, a partir de um planejamento intensivo para observar e mensurar a qualidade de um ambiente aquático com um propósito específico de uso, caracteriza um programa de monitoramento e avaliação de um corpo hídrico com objetivos múltiplos (MEYBECK; KIMSTACH; HELMER, 1996). Os gerenciadores de

recursos hídricos necessitam de informações científicas de qualidade e quantidade dentro do rio que controlam, e para tal é necessária a instalação de uma rede de estações de monitoramento por todo o perfil longitudinal do rio. Essas informações permitem estabelecer as diferenças em curto e longo prazo da quantidade de água em relação às características da bacia e o seu clima; determinam os critérios para otimização e manutenção do recurso, e as tendências sazonais da quantidade e qualidade da água em relação as mudanças demográficas, variação no uso da água e gerenciamento com o intuito de garantir a proteção da qualidade da água (MEYBECK et. al., 1996).

Neste contexto de abordagem holística dos sistemas lóticos, incluindo conceitos físicos e biológicos na organização de rios, os estudos de qualidade da água, manejo e recuperação tornaram-se mais comuns, buscando a compreensão dos processos que ocorrem de montante à jusante, que permitem relacionar as características naturais da bacia. Os modelos de qualidade de água são amplamente utilizados por órgãos reguladores e companhias concessionárias de água em todo o mundo (COX, 2003). Estes modelos disponibilizam informações essenciais que auxiliam na tomada de decisão e na tentativa da criação de um consenso sobre medidas de manejo dos recursos hídricos. O objetivo principal destes modelos é descrever mudanças espaciais e temporais nas variáveis analisadas.

A escolha de um modelo depende das necessidades do pesquisador. Em seu estudo de revisão de modelos de qualidade de água, Cox (2003) comparou o modelo QUAL2E aos seus semelhantes (SIMCAT e TOMCAT) na simulação de oxigênio dissolvido e concluiu que a conceituação do QUAL2E é superior, além de apresentar as vantagens de requerir poucas informações hidráulicas para calibração, ser de uso gratuito, e os códigos do modelo serem extensivamente documentados, o que justifica a ampla utilização do modelo.

O modelo QUAL2K é eficiente para simular condições hidrológicas e de qualidade da água de pequenos rios. O modelo utiliza a interface gráfica do *software Microsoft Office Excel*, as operações são programadas em linguagem macro *Visual Basic for Applications (VBA)* e as computações numéricas programadas em *Fortran 90*. De acordo com seus criadores (CHAPRA; PELLETIER; TAO, 2008), o modelo QUAL2K possui os seguintes aspectos:

- Unidimensional: o canal é bem misturado verticalmente e lateralmente.
- O sistema consiste em um rio principal com opção de adição de dados de tributários.
- O fluxo constante não uniforme é simulado.
- O balanço e a temperatura são simulados como uma função meteorologia com escala de tempo diária.

- As reações cinéticas e a qualidade das variáveis da água também são simulados em escala de tempo diária.
- As entradas de calor e balanço de massa pontuais e não pontuais, assim como possíveis retiradas dos mesmos são simuladas.
- A representação carbonácea da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) ocorre em duas formas: oxidação lenta e oxidação rápida.
- Em ambientes anóxicos o modelo reduz as reações de oxidação a zero e a desnitrificação é modelada como uma reação de primeira ordem que ocorre em concentrações baixas de oxigênio.
- A redução da luz é calculada em função do fitoplâncton, dos detritos e dos sólidos inorgânicos.
- O potencial hidrogeniônico (pH) é simulado considerando os resultados da simulação de alcalinidade e carbono inorgânico.
- Ocorre a simulação de patógenos genéricos, sua remoção é determinada em função da temperatura, da luz e da sedimentação.
- O modelo permite a inserção de parâmetros cinéticos específicos de trechos em condições especiais.
- As informações hidráulicas de açudes e quedas de água e suas influências nas transferências de gases estão incluídas na modelagem.
- O QUAL2K representa o rio como uma série de trechos, cada qual com características hidráulicas constantes (dados que serão inseridos pelo usuário). A Figura 1 apresenta o esquema de segmentação do modelo, sendo os trechos numerados em ordem crescente da cabeceira à foz do fluxo principal do rio.
- A segmentação do rio ocorre em trechos que são igualmente espaçados e subdivididos em elementos que podem variar de acordo com o desejo do usuário (Figura 2), inclusive as taxas de carga e descarga inseridas em cada elemento.

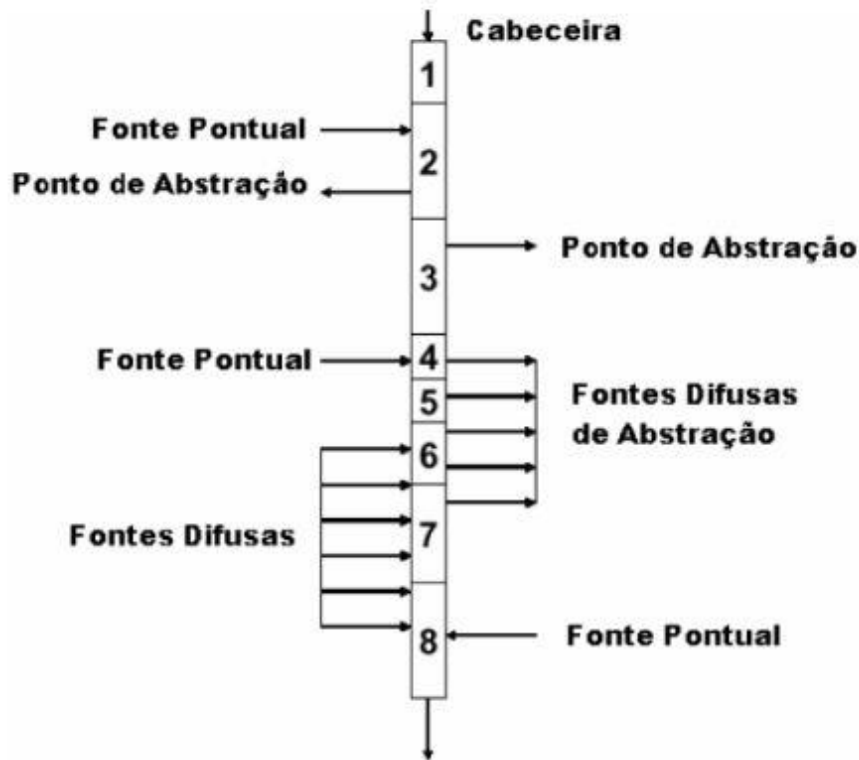


Figura 1 - Esquema de segmentação do software QUAL2K em trechos. Adaptado de CHAPRA, PELLETIER; TAO, 2008.

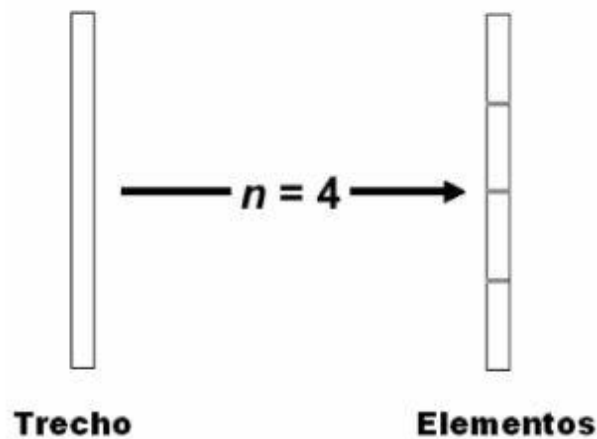


Figura 2 - Divisão de um trecho em 4 elementos de comprimentos iguais. Adaptado de Chapra, Pelletier e Tao, 2008.

Sardinha e colaboradores (2008a) utilizaram o modelo QUAL2K para realizar simulações da concentração de oxigênio dissolvido no Ribeirão do Meio – SP. Os resultados deste estudo permitiu identificar as zonas de autodepuração do rio e a necessidade de tratamento de esgoto em nível secundário para adequação da qualidade da água visando seus usos prioritários na região. Moccellini (2010) cita em sua pesquisa que pelo fato do software

QUAL2K considerar o rio como uma junção de segmentos (com dimensão determinada no momento de criação de cada modelo), os dados são fornecidos pontualmente apenas nestas intersecções e não em qualquer local do rio, limitando a precisão dos dados de saída a essas divisões. A mesma autora (op. cit.) afirma que para que haja consistência entre as simulações e a realidade, deve-se realizar uma calibração adequada, com confiabilidade nos dados observados, domínio das condições hidráulicas e morfológicas da bacia e exata localização dos pontos de descarga de poluentes e retirada da água para abastecimento. Ou seja, quanto maior o nível de conhecimento sobre a bacia em questão, mais precisa será a calibração e validação do modelo e melhor a correlação entre os dados calculados e observados.

A literatura apresenta uma tendência na utilização da última versão do modelo da família QUAL2 para estudos em rios pequenos, o QUAL2Kw, que representa uma versão modernizada do modelo QUAL2E e QUAL2K, adicionando a utilização de um algoritmo genético para uma maior eficácia na sua calibração. Esta versão utiliza o algoritmo genético PIKAIA desenvolvido por Charboneau e Knapp em 1995 e, segundo os desenvolvedores do QUAL2Kw (PELLETIER; CHAPRA; TAO, 2006), este algoritmo foi utilizado com sucesso em outras aplicações de modelagem. Em 2007, Kannel e colaboradores utilizaram o modelo para o gerenciamento do rio *Bagmati* (no Nepal) que recebia cargas de nutrientes de vários tributários. Os autores (op. cit.) consideraram que o modelo atendeu às expectativas de simulação de cenários a partir de dados de nutrientes (séries de fósforo e nitrogênio); oxigênio dissolvido; demanda bioquímica de oxigênio; sólidos suspensos totais; alcalinidade; pH; condutividade; temperatura da água e vazão, resultando em diferentes estratégias de recuperação do rio.

Turner, Pelletier e Kasper (2009) utilizaram o QUAL2Kw para descrever os impactos da entrada de nutrientes e perífiton nas concentração de oxigênio dissolvido e no pH do rio *South Umpqua*, no Oregon, e avaliaram o modelo como satisfatório para montagem de quadros que determinaram a quantidade de nutrientes que deveria ser controlada para manutenção do sistema aquático.

Para classificar os corpos de água em diferentes graus de trofia, avaliando parâmetros de qualidade de água foi desenvolvido o chamado Índice de Estado Trófico (IET). Muitos estudos têm sido feitos buscando determinar uma metodologia que englobe a maioria dos ambientes aquáticos, porém, devido à grande variabilidade de interferências e condições ambientais este desafio é muito grande. Lamparelli (2004) discutiu em sua tese os diferentes métodos de monitoramento dos graus de trofia em corpos de água no Estado de São Paulo e preconizou a utilização de diferentes níveis de representatividade das variáveis analisadas

para formulação do índice em ambientes lóticos e lênticos. A autora (op. cit.) ressalta que devido à alta relação entre o volume de água e a região marginal, e a maior velocidade de escoamento de sistemas lóticos, são encontradas maiores concentrações de fósforo e menores de clorofila *a* de maneira oposta ao que ocorre em ambientes lênticos, verificando uma grande inconsistência nas classificações realizadas pela CETESB quando aplicadas a sistemas lóticos. Lamparelli (2004) desenvolveu uma metodologia própria, derivada dos trabalhos de Carlson (1977) e Toledo et. al. (1983), com as equações para o cálculo dos índices para fósforo total e clorofila-*a* apresentadas a seguir:

$$IET(CI) = 10 * (6 - ((-0,7 - 0,6 * (\ln CI)) / \ln 2)) - 20$$

$$IET(PT) = 10 * (6 - ((0,42 - 0,36 * (\ln PT)) / \ln 2)) - 20$$

O relatório CETESB de 2011 atualmente apresenta os dados de IET à partir destas equações desenvolvidas por Lamparelli (2004) com pequenas modificações: i) não foi realizada a medida de transparência com o disco de Secchi para ambientes lóticos, uma vez que esta pode ser afetada pela elevada turbidez decorrente de material mineral em suspensão; ii) quando disponíveis os dados de ambas variáveis (fósforo total e clorofila *a*), o resultado apresentado foi a média aritmética simples dos mesmos. A

Tabela 1 apresenta os limites estabelecidos para as diferentes classes de trofia para rios.

De acordo com a resolução CONAMA 430/2011 Brasil (2005), a maioria dos rios paulistas são classificados como “Classe 2” e o rio Sorocabaçu se inclui neste grupo. Sistemas aquáticos desta categoria podem ser destinados para abastecimento humano (após tratamento convencional), proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário, irrigação e aquicultura.

Verificando a provável inexistência de dados para determinação de valores de referência em ecossistemas tropicais, Cunha, Dodds e Calijuri (2011) estudaram dados de 319 pontos de monitoramento de rios da CETESB no período de 2005 a 2009 contidas nas 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGHRI) do Estado de São Paulo, e propuseram novos valores de referência para os parâmetros fósforo total, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e demanda bioquímica de oxigênio. De acordo com os autores (op. cit.), os rios do Estado de São Paulo apresentaram um valor médio de concentração de fósforo total de 0,40 mg.L<sup>-1</sup>, classificando-os como supereutrófico de acordo com os cálculos de IET

propostos por Lamparelli (2004). A urbanização, a densidade populacional e o uso do solo estão fortemente ligados com o aumento na taxa de nitrogênio e fósforo total nas águas dos rios do Estado de São Paulo, de modo que fontes pontuais de fósforo total são associadas à descarga de efluentes de estações de tratamento de esgoto e a contribuição em nitrogênio total proveniente do escoamento por fontes difusas (CUNHA; DODDS; CALIJURI, 2011). Os valores de referência para fósforo total ( $0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ ) e nitrogênio total ( $0,31 \text{ mg.L}^{-1}$ ) calculados pelos autores (op. cit.) foram menores que os sugeridos na Resolução CONAMA 430/2011 Brasil (2005), contribuindo como nova base de informações para uma eventual revisão dos padrões para corpos de água no Brasil.

Tabela 1 -Classificação do Estado Trófico para rios utilizada pela CETESB segundo Índice de Carlson modificado. Fonte: CETESB 2011.

| Categoria<br>(Estado Trófico) | Ponderação                | Fósforo Total (P)<br>( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | Clorofila- <i>a</i> (CL)<br>( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) |
|-------------------------------|---------------------------|---|--|
| Ultraoligotrófico             | $\text{IET} \leq 47$      | $\text{P} \leq 0,013$                       | $\text{CL} \leq 0,74$                                |
| Oligotrófico                  | $47 < \text{IET} \leq 52$ | $0,013 < \text{P} \leq 0,035$               | $0,74 < \text{CL} \leq 1,31$                         |
| Mesotrófico                   | $52 < \text{IET} \leq 59$ | $0,035 < \text{P} \leq 0,137$               | $1,31 < \text{CL} \leq 2,96$                         |
| Eutrófico                     | $59 < \text{IET} \leq 63$ | $0,137 < \text{P} \leq 0,296$               | $2,96 < \text{CL} \leq 4,70$                         |
| Supereutrófico                | $63 < \text{IET} \leq 67$ | $0,296 < \text{P} \leq 0,640$               | $4,70 < \text{CL} \leq 7,46$                         |
| Hipereutrófico                | $\text{IET} > 67$         | $0,640 < \text{P}$                          | $7,46 < \text{CL}$                                   |

Com o intuito de obter maior representatividade dos dados e melhor eficácia das conclusões desta pesquisa, foi utilizada a abordagem sugerida por Cunha, Dodds e Calijuri (2011) para discussão dos cenários propostos, pois esta pesquisa foi baseada em bacias do Estado de São Paulo, incluindo a do rio Sorocabaçu. Desta forma, os resultados aqui obtidos poderão contribuir para o gerenciamento da bacia do Sorocabaçu, além da implementação de informações sobre ecossistemas tropicais para futuros estudos.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

A Lei nº 7.663/91 estabeleceu vinte e duas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos no Estado de São Paulo com base nas bacias hidrográficas e agrupou os municípios situados nessas unidades de acordo com seus interesses comuns (REDE DAS ÁGUAS, 2000). A área estudada está situada na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos dos rios Sorocaba e Médio Tiete (UGRHI-10). O mesmo relatório (op. cit.) informa que, devido à extensão da UGRHI-10 e às peculiaridades intra-regionais, foi realizada sua divisão em seis sub-bacias hidrográficas: Médio Tietê Inferior, Médio Tietê Médio, Baixo Sorocaba, Médio Sorocaba, Médio Tietê Superior e Alto Sorocaba.

O rio Sorocabuçu juntamente com os rios Sorocamirim e Una formam o rio Sorocaba localizado na porção sudeste do Estado de São Paulo na Bacia do Alto Sorocaba (Figura 3) que forma a represa de Itupararanga, que possui elevada importância econômica na região e é objeto de pesquisas científicas e projetos de preservação centrais do Comitê de Bacia Hidrográfica dos rios Sorocaba e Médio Tietê – CBH-SMT. De acordo com o relatório CETESB de 2011, a qualidade de água deste reservatório foi uma das mais prejudicadas no decorrer dos últimos anos (fato corroborado pela redução do seu índice de estado trófico), evidenciando a importância de estudos científicos que possam contribuir no entendimento das fontes impactantes e ações de controle no uso deste recurso hídrico.

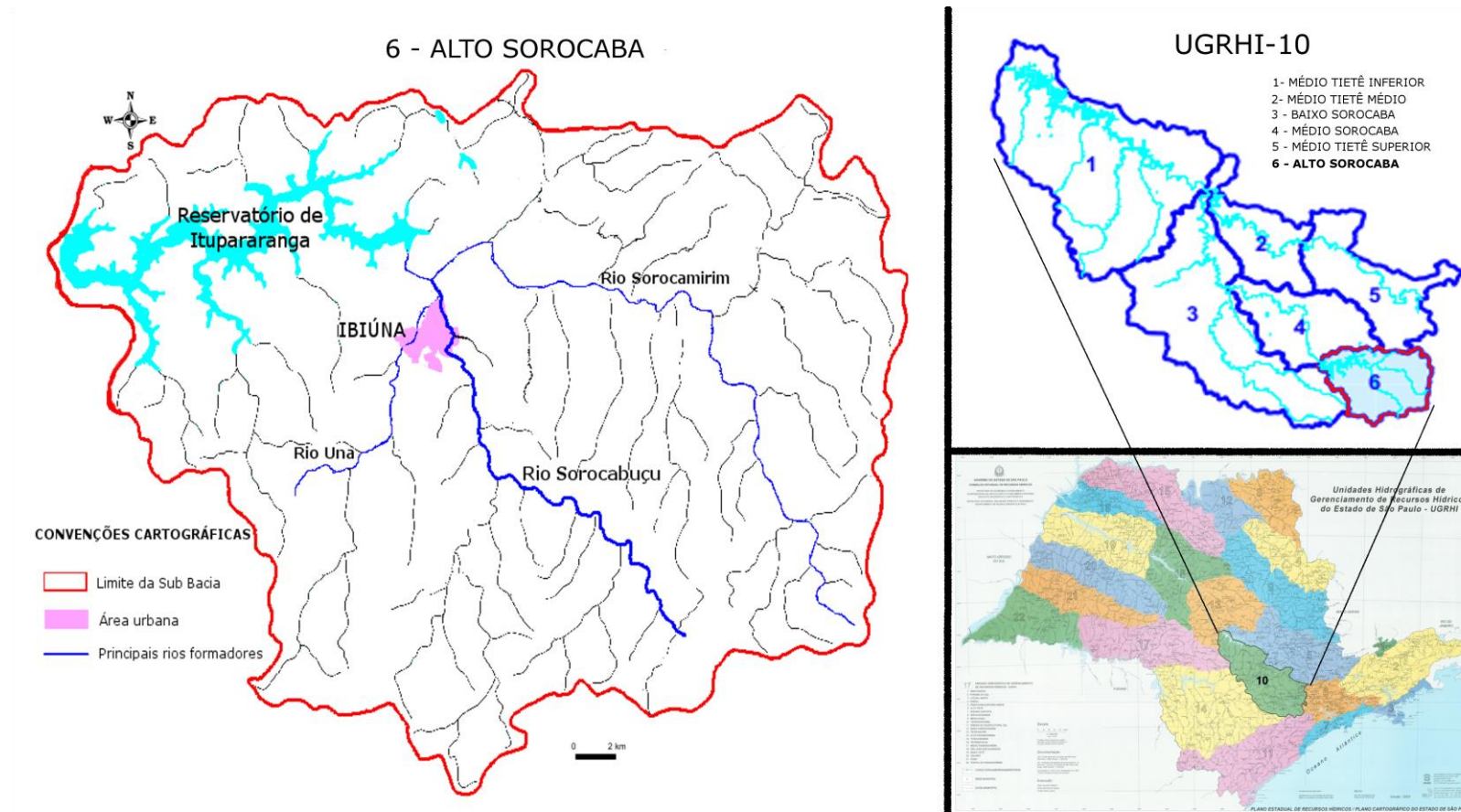


Figura 3 – Localização da sub-bacia e rio em estudo no espaço territorial brasileiro. Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2008) – modificado pelo autor.

Segundo Sardinha (2008b), a sub-bacia do Alto Sorocaba possui uma área de 929 km<sup>2</sup> se situando entre os paralelos 23°45'37'' e 23°35'02'' de latitude S e 47°21'00'' e 46°57'29'' de longitude W e possui 393 km<sup>2</sup> ocupados com olerícolas, seguidos da batata e do tomate e 71 km<sup>2</sup> de área urbanizada (dos quais 55 km<sup>2</sup> são caracterizados por pequenos aglomerados populacionais como vilas e vilarejos).

O rio Sorocabuçu percorre o município com maior ocupação da área da Bacia, Ibiúna, que possui uma área de 1.057,542 km<sup>2</sup> e uma população de 71.217 habitantes, sendo destes, 46.284 (65%) residentes rurais, de acordo com o IBGE (2010). A estrutura fundiária deste município indica a predominância de propriedades de até 200 hectares e 10,80% de seu território (11.771,6 hectares) são ocupados por áreas cultivadas, das quais 13,5% constituem-se em culturas de repolho e brócolis (REDE DAS ÁGUAS, 2000).

O nível de atendimento de tratamento de esgoto no município de Ibiúna em sua área urbana não ultrapassou o índice de 60% até o ano de 2010 (Figura 4). Este índice se reduz para um valor geral de tratamento de 34,7%, de acordo com a Secretaria de Estado de Saneamento e Energia de São Paulo (SSE-CSAN), uma vez que a menor parcela da população (35%) deste município é urbana, e esta é a única que recebe atendimento de coleta e tratamento de esgoto. Em sua pesquisa, Salles *et al.* (2008) apontam que os principais impactos sofridos pela bacia são referentes ao despejo de esgotos, fossas e resíduos sólidos, além do uso indiscriminado de agrotóxicos decorrente da agricultura intensiva. Tais atividades e usos provocam o comprometimento dos usos múltiplos e possíveis problemas de saúde para a população.

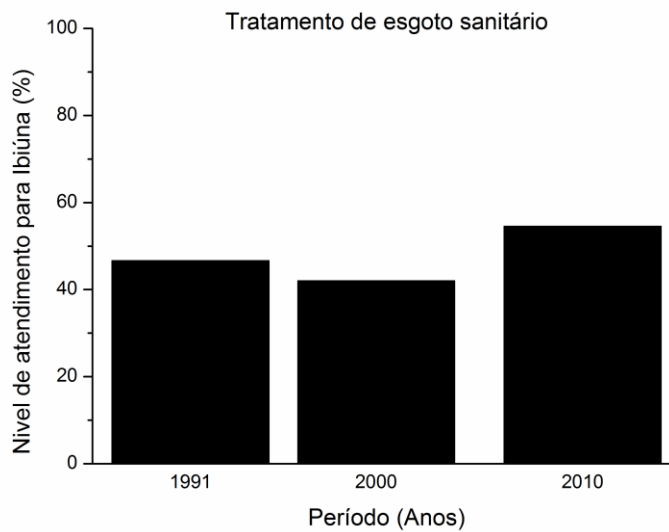


Figura 4 - Nível de atendimento de tratamento de esgoto sanitário na área urbana para o município de Ibiúna. (SEADE,2011).

### 3.1.1 Pontos de amostragem

Após o estudo prévio dos mananciais da região e escolha do rio Sorocabuçu, foi realizada uma campanha de reconhecimento do local de estudo, com seleção de pontos representativos para caracterização do rio e calibração do modelo a ser utilizado (QUAL2Kw). Tais pontos podem ser identificados através da Figura 5.

As coletas no rio estudado foram realizadas nos dias 29 de julho de 2011, 18 de outubro de 2011, 08 de fevereiro de 2012 e 18 de abril de 2012; contemplando os quatro períodos sazonais: inverno, primavera, verão e outono, respectivamente.

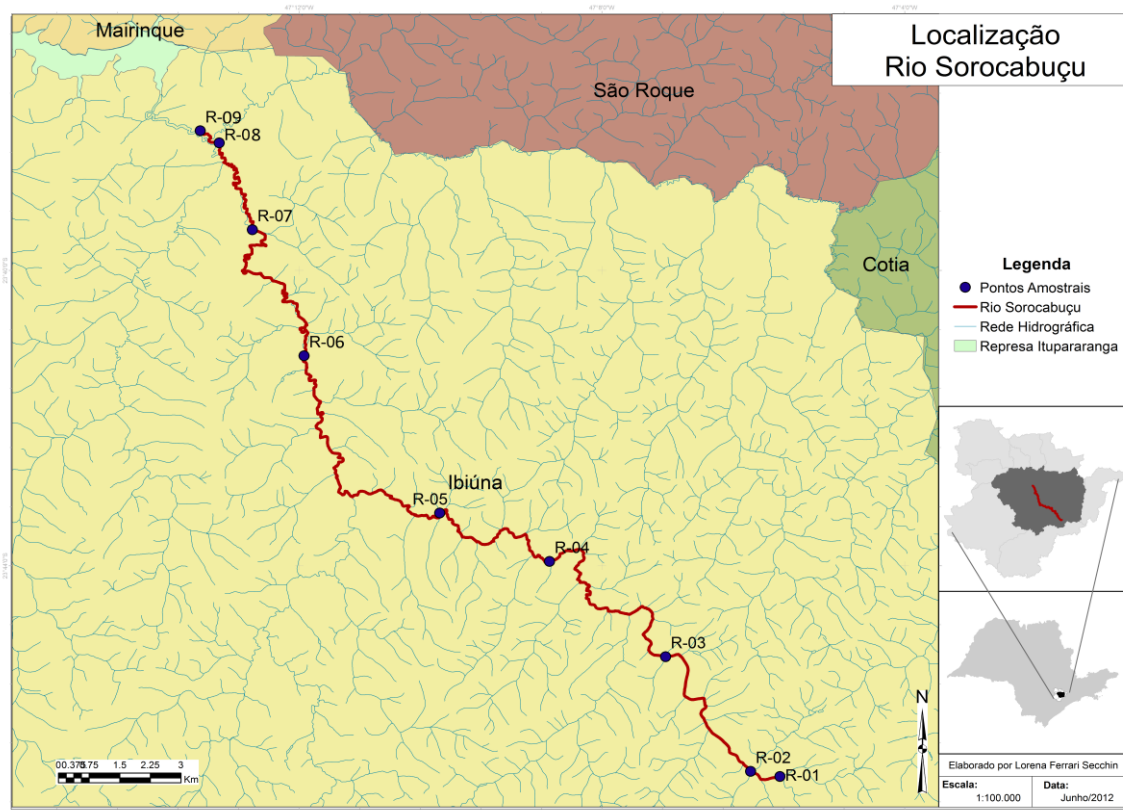


Figura 5 - Pontos de coleta pré selecionados para amostragem no rio Sorocabuçu (SP).

O comprimento total do rio Sorocabuçu é de 33,6 km e a descrição das estações de amostragem e suas imagens serão exibidas a seguir.

**Estação R-01 (quilômetro 0,0):** Situada na zona rural do município de Ibiúna, com coordenadas geográficas  $23^{\circ} 46' 56''$  S e  $47^{\circ} 05' 39''$  O, representa a nascente do rio Sorocabuçu. À montante e jusante do ponto de coleta há trechos de mata preservada. No ponto de amostragem o curso d'água é cortado por uma estrada vicinal e em ambas as margens há presença de capins. Existem aproximadamente sete residências em um raio de 500 metros da nascente. Recebe incidência direta de luz e a largura do canal é de aproximadamente 1,5 metros.

**Estação R-02 (quilômetro 0,7):** Situada na zona rural do município de Ibiúna com coordenadas geográficas  $23^{\circ} 46' 47''$  S e  $47^{\circ} 06' 06''$  O. À sua montante há trecho de mata preservada e à jusante é cortado por uma estrada vicinal e há o despejo irregular de esgoto proveniente de pequenas residências e de uma escola rural. Não recebe incidência direta de luz e a largura do canal é de aproximadamente 2,5 metros.

**Estação R-03 (quilômetro 5,0):** Situada na zona rural do município de Ibiúna, com coordenadas geográficas  $23^{\circ} 45' 16''$  S e  $47^{\circ} 07' 08''$  O, é cortada por uma estrada vicinal. À

montante e jusante há trechos de mata preservada. Possui cerca de cinco residências em seu entorno. Não recebe incidência direta de luz, o canal é irregular e tem largura de aproximadamente quatro metros.

**Estação R-04 (quilômetro 11,1):** Situada na zona rural do município de Ibiúna, com coordenadas geográficas 23° 43' 57'' S e 47° 08' 39'' O, é cortada por uma estrada vicinal. À montante e jusante há trechos de mata preservada. Ambas as margens apresentam capim alto e em sua margem direita há uma pequena chácara com uma lagoa e à margem esquerda duas ou três residências mais distantes. Recebe incidência direta de luz e a largura do canal é de aproximadamente 3,5 metros.

**Estação R-05 (quilômetro 15,2):** Situada na zona rural do município de Ibiúna, com coordenadas geográficas 23° 43' 17'' S e 47° 10' 08'' O, é cortada por uma estrada vicinal. À montante há trechos de mata preservada enquanto à jusante há a captação para irrigação de algumas zonas de cultivo em sua margem direita, além da utilização da água para a lavagem de hortaliças no mesmo local. Não recebe incidência direta de luz e a largura do canal é de aproximadamente sete metros.

**Estação R-06 (quilômetro 23,4):** Situada na zona rural do município de Ibiúna, com coordenadas 23° 41' 09'' S e 47° 11' 56'' O, é cortada por uma estrada vicinal já asfaltada e se encontra a menos de quatro quilômetros de um bairro urbanizado afastado do município. À montante há trechos de mata preservada e à jusante existe a formação de uma pequena lagoa no curso do rio. Existe uma intensificação no número de residências no entorno deste ponto de amostragem, além de uma igreja e uma pequena loja de conveniências. Não recebe incidência direta de luz e a largura do canal é de aproximadamente sete metros.

**Estação R-07 (quilômetro 29,3):** Situada na zona urbana do município de Ibiúna, com coordenadas geográficas 23° 39' 29'' S e 47° 12' 35'' O, é cortada pela SP-250 (Rodovia Bunjiro Nakao) que possui um fluxo constante de veículos (fica a menos de 300m da entrada principal do município). À montante e jusante há trechos de mata preservada. Recebe incidência direta de luz e a largura do canal é de aproximadamente seis metros.

**Estação R-08 (quilômetro 32,9):** Situada em uma área de várzea próxima à área urbana do município de Ibiúna, com coordenadas geográficas 23° 39' 26'' S e 47° 12' 39'' O, a menos de 200 metros do ponto de encontro com o rio Sorocamirim. À sua montante o rio possui um curso meândrico e observa-se a formação de pequenas lagoas em seu trajeto. À jusante o canal é meândrico e se encontra com o rio Sorocamirim e também com o rio Una para formar o rio Sorocaba. Pouco após o encontro com o rio Una há despejo do efluente da

estação de tratamento de esgoto do município de Ibiúna. Há incidência direta de luz e a largura do canal é de aproximadamente três metros.

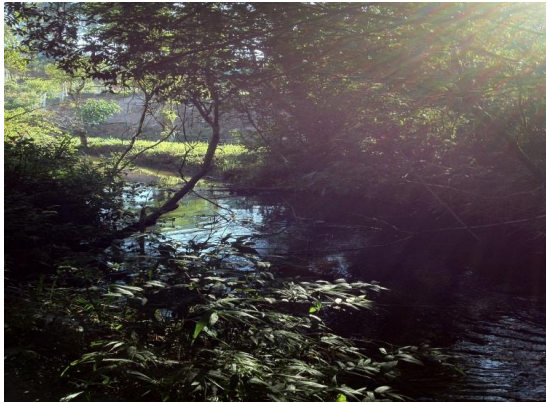
**Estação R-09 (quilômetro 33,6):** Situada em uma área de várzea próxima à área urbana do município de Ibiúna, com coordenadas geográficas 23°38'09.7''S e 47°13'25.6''O, o ponto esta localizado no início do rio Sorocaba. Tanto a montante quanto a jusante, as margens estão ocupadas por vegetação rasteira, sendo que a margem esquerda sofre impactos constantes com a atividade de pesca no local, verificando-se a presença de lixo na mesma. No ponto de amostragem a largura da calha do rio é de aproximadamente 15,0 m e o rio recebe incidência direta de luz. Observou-se que logo após a confluência de seus rios formadores (a cerca de um quilômetro deste ponto de amostragem), ocorre o descarregamento do efluente da estação de tratamento de esgoto de Ibiúna.

As Figuras 6 e 7 apresentam as fotos das estações de amostragens do rio Sorocabuçu (R-01 a R-08) e do rio Sorocaba (R-09).

R-01



R-02



R-03



R-04



R-05



R-06



R-07



R-08



Figura 6 - Fotos dos pontos de amostragens do rio Sorocabuçu.

R-09



Figura 7 - Fotos do ponto de amostragem do rio Sorocaba.

### 3.2 Variáveis hidráulicas

A vazão ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) foi calculada a partir da determinação dos perfis de velocidade de escoamento (segmentação da área transversal do rio e determinação da velocidade média de escoamento em cada segmento de área). Para medição das velocidades de escoamento foi utilizado o método do molinete hidrométrico, de acordo com Wisler e Brater (1964), método amplamente empregado para o cálculo de pequenas e médias vazões. A declividade foi calculada a partir de medições do declive em todos os pontos, sendo que em cada um deles, foi medido 100 metros acima e abaixo com variações de 25 metros de intervalo.

### 3.3 Variáveis climatológicas

Os dados referentes à temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) foram obtidos junto Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) com estação climatológica localizada em Sorocaba e os referentes à precipitação pluviométrica (mm) foram obtidos junto ao DAEE/CTH, no posto E4-047 localizado no município de Ibiúna, com coordenadas geográficas de latitude  $23^{\circ}39'$  S e longitude  $49^{\circ}13'$  O e altitude de 880 metros.

### 3.4 Variáveis físicas e químicas da água

As variáveis físicas e químicas da água foram determinadas de acordo com a metodologia descrita na Tabela 2. Temperatura da água (°C), pH, oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) e condutividade elétrica ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ) foram medidas *in situ* com equipamento multi-sonda (Yellow Springer, 556 MPS) devidamente calibrado.

Tabela 2- Variáveis físicas e químicas a serem analisadas e os respectivos métodos e referências utilizados.

| Variáveis  | Métodos   | Referência  |
|--|---|-------------|
| Temp (°C)  | Potenciométrico   | -           |
| OD ( $\text{mg.L}^{-1}$ )  | Potenciométrico   | -           |
| pH   | Potenciométrico   | -           |
| Cond ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )   | Potenciométrico   | -           |
| Alcalinidade<br>( $\text{mgCaCO}_3.\text{L}^{-1}$ )                            | Titulação - Método 2320B  | APHA (2005) |
| SST, SSI e SSO<br>( $\text{mg.L}^{-1}$ )                                       | Gravimétrico - Método 2540D e 2540E   | APHA (2005) |
| PTot ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )  | Espectrofotométrico - Método 4500P B<br>- Digestão com persulfato                             | APHA (2005) |
| PO <sub>4</sub> ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )                                       | Espectrofotométrico - Método 4500P E<br>- Ácido ascórbico                                     | APHA (2005) |
| NTK ( $\text{mg.L}^{-1}$ )   | Método 4500N C - Digestão com<br>persulfato e Método 4500NH <sub>3</sub> C -<br>Titulométrico | APHA (2005) |
| NO <sub>3</sub> ( $\text{mg.L}^{-1}$ )   | Espectrofotométrico Ultravioleta -<br>Método 4500NO <sub>3</sub> B                            | APHA (2005) |
| NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )                                       | Colorimétrico - Método 4500NO <sub>2</sub> B  | APHA (2005) |
| Carbono Total, Orgânico<br>e Inorgânico<br>(CT/COT/CIT) ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | Método 5310 B - Combustão à alta<br>temperatura   | APHA (2005) |

### **3.5 Variáveis biológicas da água**

As variáveis determinadas foram clorofila-*a* e feofitina ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) por meio de filtração em membranas de fibra de vidro GF/C, com extração dos pigmentos com etanol 80% e posterior análise dos extratos em espectrofotometria seguindo a metodologia descrita em Nusch (1980) e modificada segundo a Norma Holandesa 6520 (Nederlandse Norm NEN 6520, 1981), com leituras nos comprimentos de onda de 665 nm e, após acidificação, 750 nm.

### **3.1 Variáveis físicas e químicas do sedimento**

As variáveis físicas e químicas do sedimento que foram analisadas são: teor de matéria orgânica (%), Nitrogênio Total Kjeldhal – NTK ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) e fósforo total ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) seguindo os métodos descritos por TRINDADE (1980), APHA (2005) e ANDERSEN (1976), respectivamente.

### **3.1 Cálculo do índice de estado trófico**

Os índices de estado trófico (IET) observados foram calculados de acordo com a metodologia apresentada por Lamparelli (2004).

### **3.2 Utilização do modelo QUAL2Kw e simulação de cenários**

O modelo utilizado para simulação dos cenários deste estudo foi o QUAL2Kw, regulamentado pela Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (US Environmental Protection Agency – EPA) e disponível para download em sua página oficial ([www.epa.gov](http://www.epa.gov))

gratuitamente. Ele representa uma versão atualizada e com novas ferramentas do modelo QUAL2E, bastante difundido em estudos relacionados à qualidade da água em sistemas lóticos, e mostrou-se eficiente atendendo à proposta do estudo como em outros casos já citados no item revisão bibliográfica.

Para que fossem realizadas as simulações, o modelo foi calibrado de acordo com as recomendações do guia do usuário disponibilizado pela EPA e uma breve descrição desta etapa será apresentada a seguir:

- Partindo da nascente do rio Sorocabuçu (estação R-01) até sua foz e formação do rio Sorocaba (estações R-08 e R-09, respectivamente), foram simulados todos os 34 quilômetros de curso de água, compreendendo a área rural e urbana do município de Ibiúna. A estrutura funcional do modelo demanda que este percurso seja dividido em trechos e estes então em elementos de mesmo comprimento, resultando neste caso em oito trechos e 85 elementos de 400 metros de comprimento (Figura 8).
- As simulações do modelo foram realizadas através de equações de balanços de massa e energia. Os dados de entrada que foram inseridos, obtidos através das amostragens das variáveis limnológicas nas estações amostrais R-01 à R-09, foram: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ); condutividade elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ); sólidos suspensos inorgânicos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); oxigênio dissolvido ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); nitrato ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ); fósforo total ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ); carbono orgânico total ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); alcalinidade ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); pH; coordenadas geográficas (GMS); altitude (m); largura do canal (m); declividade (m); vazão ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ); altura da água (m) e velocidade do escoamento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).
- As diferenças entre as características qualitativas e quantitativas da água a montante e a jusante de cada ponto foram relacionadas à contribuição difusa para a calibração do modelo e os valores desta contribuição foram estimados pelo autor por tentativa e erro na planilha “Diffuse Sources” do modelo. De acordo com o plano municipal de saneamento do município de Ibiúna, existe uma captação de água do rio Sorocabuçu distante aproximadamente quatro quilômetros de sua foz. Essa informação foi considerada e aplicado ao modelo como abstração de  $135\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  e pode ser observado na Figura 8.
- Os parâmetros de saída calibrados foram: i) vazão; ii) pH; iii) OD; iv) SST; v) condutividade; vi) fósforo total e ; vii) nitrogênio total., porém os mais representativos e aqui apresentados foram SST, NT, PT e OD.

- O método de integração selecionado no modelo foi o de Euler, para solução do pH utilizou-se o método de Newton-Raphson e a calibração hidráulica realizada através da fórmula de Manning.
- Para calibração das taxas de carbono, nitrogênio, fósforo e oxigênio foi utilizada a ferramenta de auto-calibração do modelo QUAL2Kw em sua planilha *Rates*. Neste caso, o modelo calibra estes valores de nutrientes após a determinação de uma faixa de valores pelo usuário (foi utilizada a faixa padrão de acordo com o observado no manual) e para a taxa de reaeração foi selecionada a opção de cálculo denominada *Internal*, onde o modelo utiliza um esquema de padronização próprio para realizar os cálculos, de acordo com as características hidráulicas do rio.

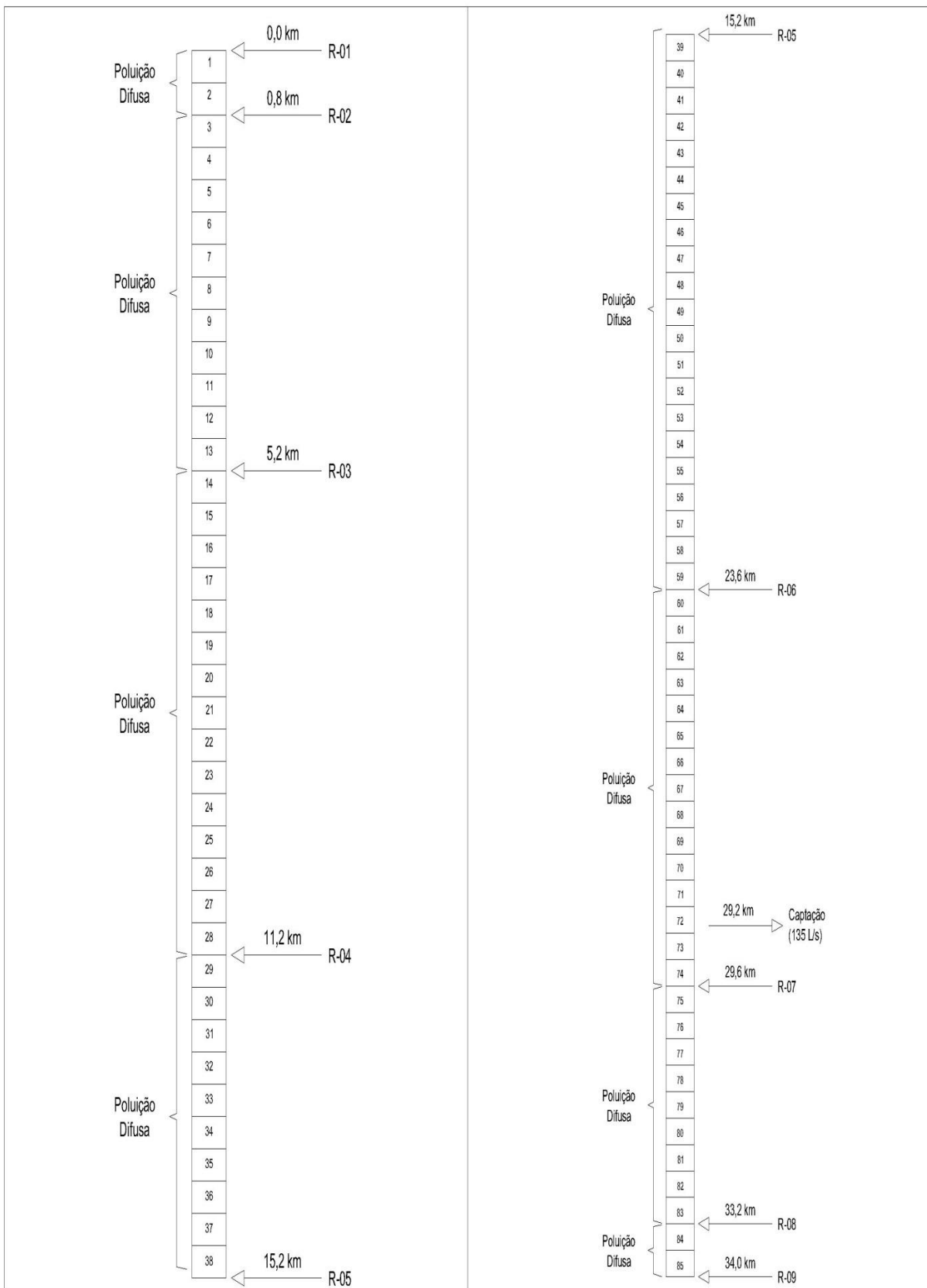


Figura 8 - Diagrama unifilar do trecho simulado do rio Sorocabaçu, indicando o posicionamento dos pontos de amostragem e os trechos e elementos que recebem poluição difusa.

A Secretaria de Estado de Saneamento e Energia de São Paulo (SSE-CSAN) elaborou em 2010 um documento que serve de apoio técnico à elaboração dos planos municipais de saneamento para os municípios da UGRHI-10. Com o intuito de contribuir com informações relevantes para tomada de decisão na bacia do rio Sorocabaçu, os cenários simulados com o modelo QUAL2Kw foram baseados nas metas preconizadas para o município de Ibiúna, que tem relação estreita com este corpo hídrico. De acordo com este relatório, o índice de atendimento no município de Ibiúna é de apenas 34,7%. Como a maioria da população do município situa-se na zona rural, pressupõe-se que a maior parcela de carga poluidora do rio Sorocabaçu seja derivada da poluição difusa e principalmente do despejo de esgotamento doméstico diretamente neste rio, comprometendo a sua qualidade da água. Sendo assim, os cenários elaborados foram:

- Cenário 0 - “Cond. atual 2012”: condições de poluição difusa e coleta e tratamento de esgoto domiciliar (35%), referentes ao ano de 2012.
- Cenário 01 - “Cond. atual 2022”: condições de poluição difusa e coleta e tratamento de esgoto domiciliar (35%), referentes ao ano de 2022.
- Cenário 02 - “Cond. atual 2032”: condições de poluição difusa e coleta e tratamento de esgoto domiciliar (35%), referentes ao ano de 2032.
- Cenário 03 - “Sem trat. 2012”: poluição difusa sem coleta e tratamento de esgoto, referente ao ano de 2012.
- Cenário 04 - “Sem trat. 2022”: poluição difusa sem coleta e tratamento de esgoto, com população estimada do ano de 2022.
- Cenário 05 - “Sem trat. 2032”: poluição difusa sem coleta e tratamento de esgoto, com população estimada do ano de 2032.
- Cenário 06 - “Melhoria 2012”: condições de redução da carga de poluição difusa em 60%, referentes ao ano de 2012.
- Cenário 07 - “Melhoria 2022”: condições de redução da carga de poluição difusa em 60%, referentes ao ano de 2022.
- Cenário 08 - “Melhoria 2032”: condições de redução da carga de poluição difusa em 60%, referentes ao ano de 2032.

Para as estimativas de população foram utilizados os dados disponíveis pela Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados (SEADE), de São Paulo, apresentando os valores de 72.224 habitantes no município de Ibiúna, com crescimento anual de 0,75% ao ano. A partir

destas informações, concluiu-se que a população estimada para 2022 e 2032 neste mesmo município seja de 77.827 e 83.865 habitantes, respectivamente.

### **3.3 Cálculo das cargas de nutrientes e sólidos do rio Sorocabuçu e Sorocaba para os pontos de coleta.**

Utilizando os dados de vazão, sólidos suspensos, carbono, nitrogênio e fósforo totais, foi possível realizar o cálculo da carga destes parâmetros de acordo com a seguinte equação:

$$C_x: \frac{\text{variável}_x \cdot Q \cdot 86400}{10^6}$$

Onde:

$C_x$ : carga mássica diária da variável<sub>x</sub>; 86400: conversão de segundos (s) para dia; variável<sub>x</sub>: concentração da variável na água (mg.L<sup>-1</sup>); Q: vazão medida no ponto de coleta; 10<sup>6</sup>: conversão de miligrama (mg) para quilograma (kg).

Deste modo, os resultados referentes ao rio Sorocabuçu foram representados pelos dados obtidos no ponto de coleta R-07, uma vez que este é o ponto mais próximo da foz que se obteve dados de vazão. Os valores para o rio Sorocaba foram obtidos a partir dos dados do ponto de coleta R-09. A partir destes resultados, pôde-se definir a quantidade de nutrientes e sólidos exportados pelo rio Sorocabuçu para o rio Sorocaba durante o ano de 2011-2012 nos diferentes períodos sazonais. Para efeito de comparação, as unidades foram convertidas de acordo com as utilizadas no estudo de Cunha (2012), que realizou coletas e análise de cargas para o rio Sorocaba em quatro períodos sazonais entre 2009-2010.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Variáveis hidráulicas e climatológicas

#### 4.1.1 Vazão

As vazões foram calculadas em todos os pontos de coleta do rio Sorocabuçu, com exceção de R-06 e R-08 e estão apresentadas na Figura 9. A menor vazão para o rio Sorocabuçu foi observada no ponto de nascente R-01 ( $0,051 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) durante o outono e a maior ocorreu no ponto R-07 ( $5,709 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) durante a primavera; o ponto R-09 apresentou maiores valores de vazão porque representa o rio Sorocaba, formado pelo rio Sorocabuçu, Una e Sorocamirim e teve o seu valor de pico também durante a primavera ( $20,749 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Notou-se uma relação direta entre a precipitação e a vazão no rio Sorocabuçu, com destaque no período de primavera, onde ocorreu a maior precipitação observada nos poucos dias antecedentes a coleta. A elevação dos valores de vazão de montante à jusante e o aumento acentuado nos pontos R-07 e R-09 evidenciaram a influência da superfície de inundação no rio, conforme o conceito de descontinuidade serial estendido de Ward e Stanford (1995), que ocorre justamente onde o canal do rio Sorocabuçu é mais meândrico e se encontra com os rios Una e Sorocamirim.

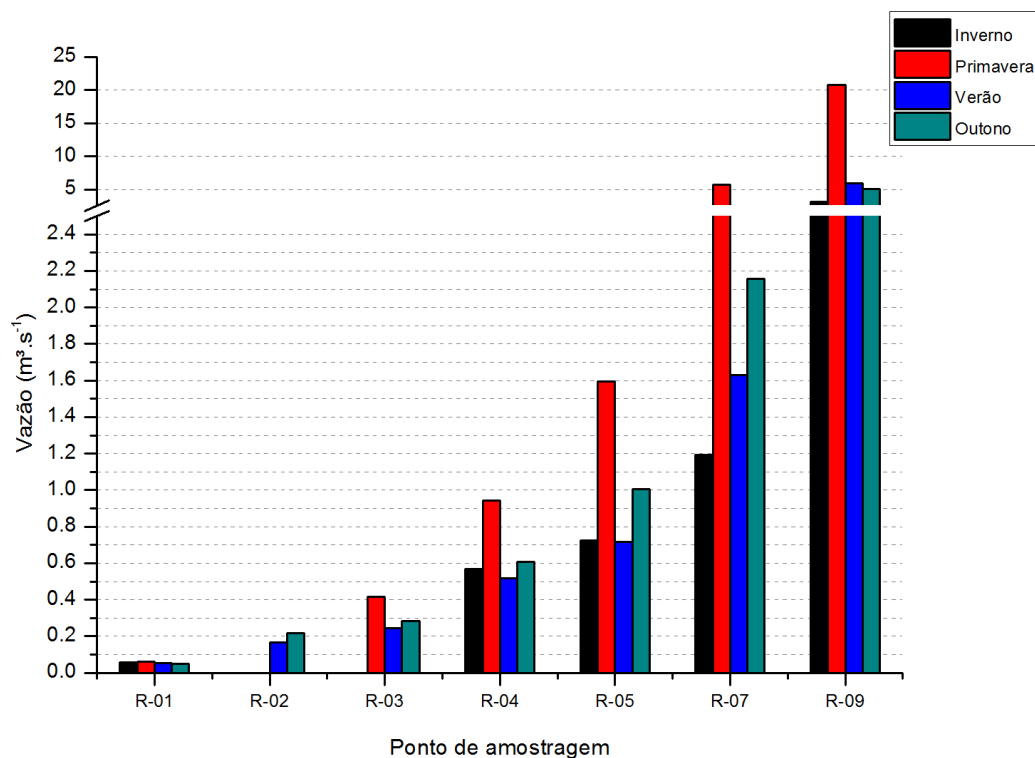


Figura 9 - Vazão ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.1.2 Temperatura do ar

De acordo com os Planos Integrados Regionais e Municipais de Saneamento Básico para a UGHRI 10 (2010), o município de Ibiúna apresenta um clima tropical de altitude e do tipo Cfa de acordo com a classificação de Köppen, com verão quente e chuvas de verão, temperatura média do mês mais frio inferior a  $18\text{ }^\circ\text{C}$  e do mês mais quente superior a  $22\text{ }^\circ\text{C}$ . Tais informações são corroboradas pela Figura 10, com temperatura média mensal mínima de  $15,1\text{ }^\circ\text{C}$  durante a coleta de inverno e máxima de  $33,9\text{ }^\circ\text{C}$  no verão.

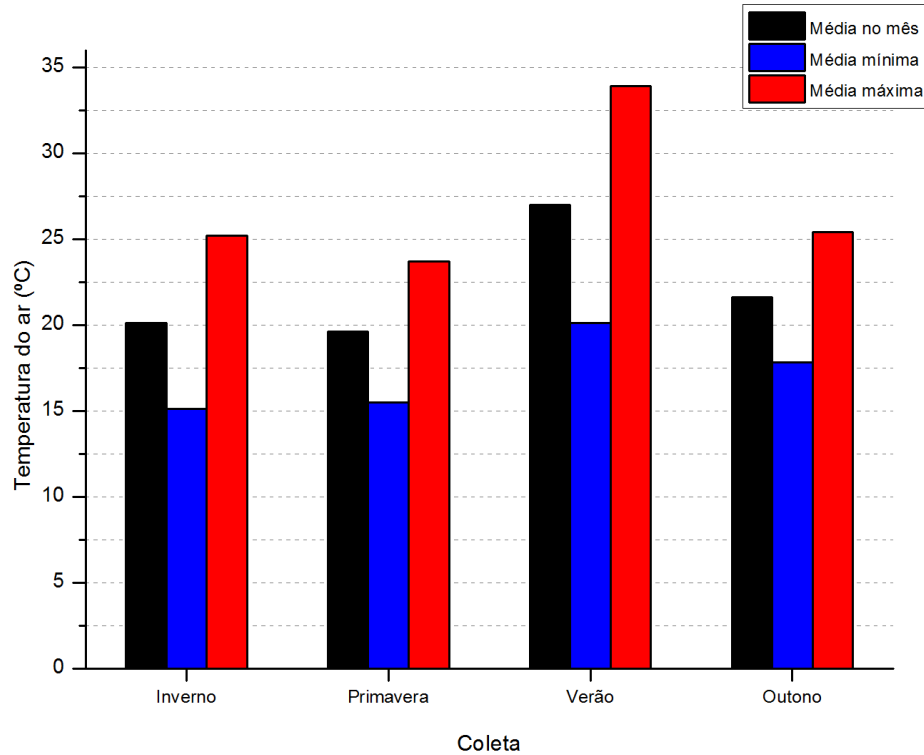


Figura 10 – Temperaturas médias mensais, máximas e mínimas do ar (°C) próxima ao município de Sorocaba. Fonte: CIIAGRO.

#### 4.1.3 Precipitação pluviométrica

A Figura 11 possibilita uma análise temporal das características das chuvas durante o período que vai de 2004 a 2012, apresentando a distribuição das mesmas ao longo do ano e recebendo destaque (cor azul) os meses que coincidem com os que foram realizadas as coletas desta pesquisa. Observou-se que o período mais chuvoso na bacia se iniciou no mês de outubro e se estendeu até março, apresentando uma média de 170 mm, enquanto o período considerado seco ocorreu desde o mês de abril até setembro, com média de 65 mm de precipitação. Observando a Figura 12 verificou-se a precipitação em cada mês do ano em que foram realizadas as coletas, com maiores volumes em janeiro (317 mm) e outubro (169 mm). Também revelou o mês de abril com 168 mm, valor maior do que o esperado para este período sazonal, podendo influenciar nos resultados.

Os dados de precipitação das datas das coletas e os seus cinco dias anteriores podem ser observados na Figura 13. Nas campanhas de inverno e verão não foi identificada nenhuma ocorrência de chuva na bacia do rio Sorocabaçu nos cinco dias anteriores e no dia das coletas. Durante a coleta de outono, notou-se a ocorrência de um episódio de chuva forte dois dias antes da amostragem (18 de abril de 2012). Durante os dias 14, 15 e 16 de outubro de 2011

(anteriores à coleta de primavera), houve a ocorrência da maior precipitação registrada durante todo este período sazonal, influenciando fortemente nos resultados de todos os parâmetros de qualidade da água.

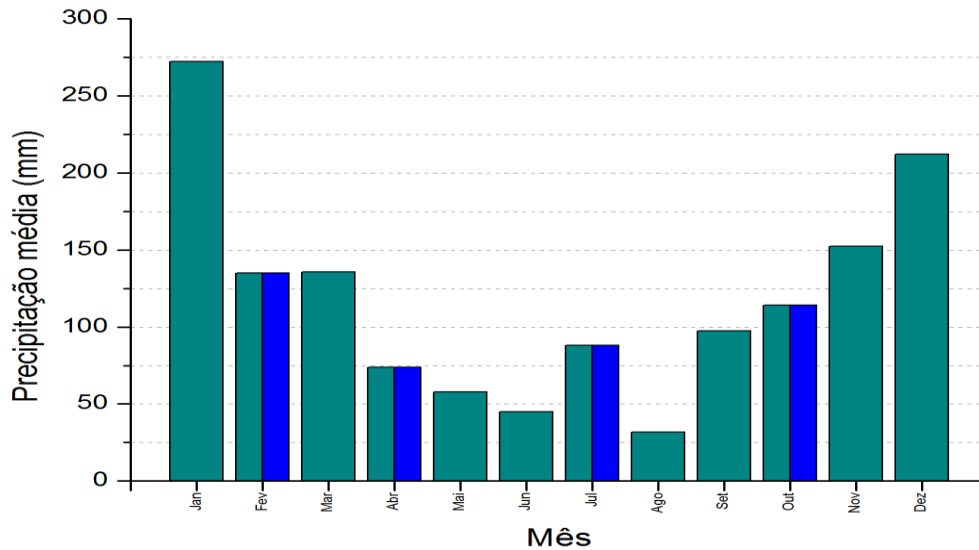


Figura 11 - Dados médios de precipitação mensal (mm) na bacia do rio Sorocabuçu no período 2004-2012. (Fonte: DAEE/CTH)

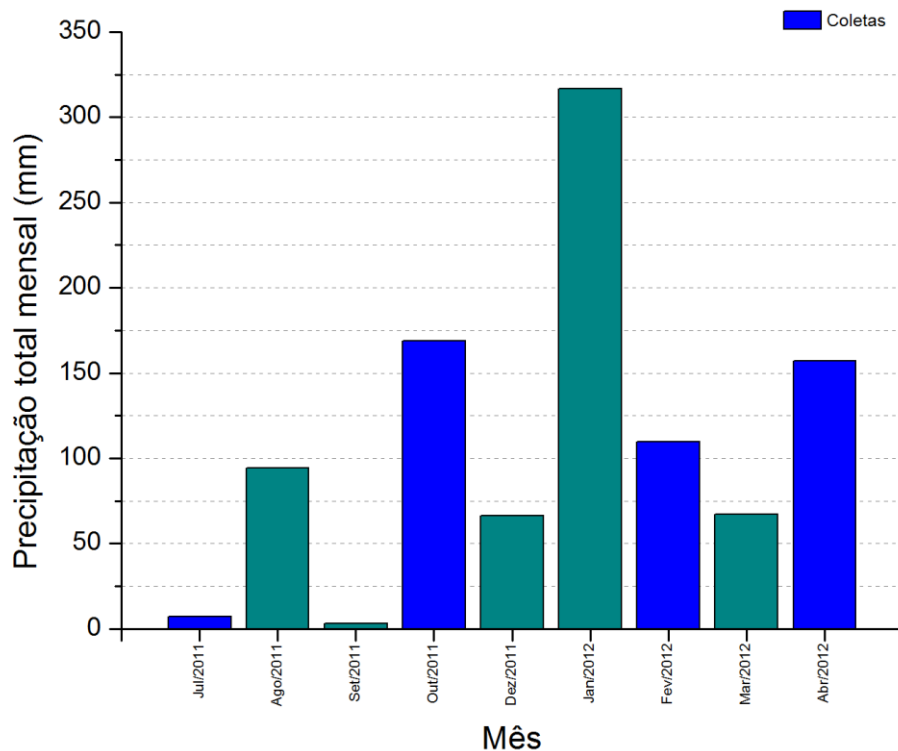


Figura 12- Dados de precipitação total mensal (mm) na bacia do rio Sorocabuçu no período das coletas. (Fonte: DAEE/CTH)

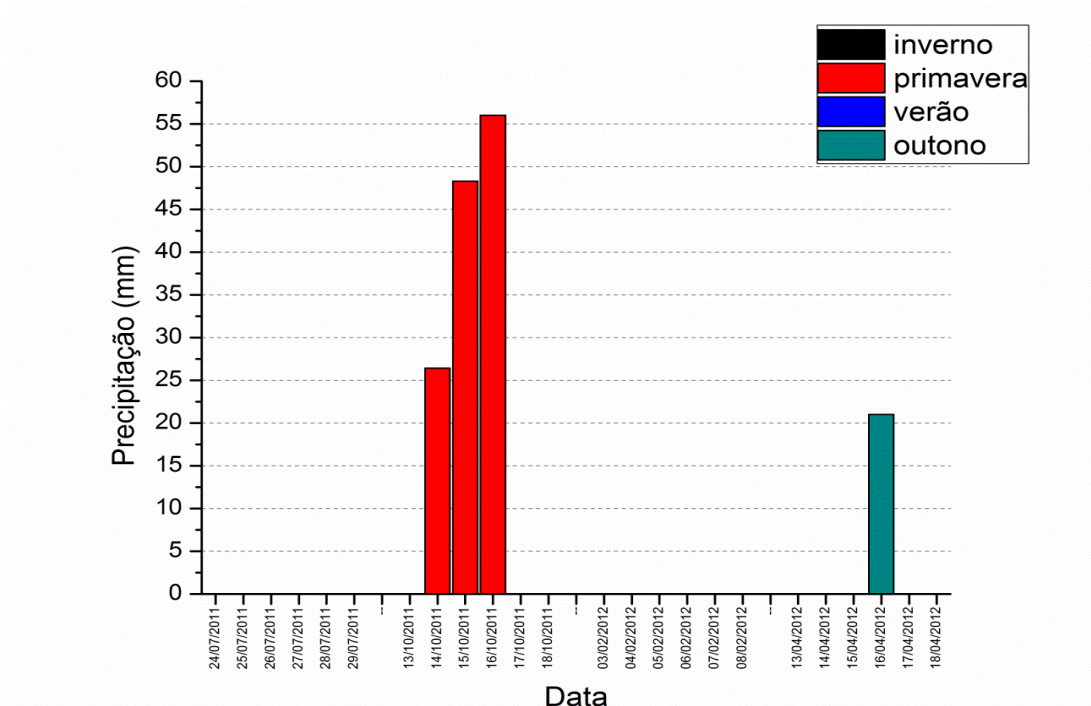


Figura 13 – Dados diários de precipitação (mm) da bacia do rio Sorocabuçu durante a data de cada coleta e nos cinco dias anteriores no Inverno, Primavera, Verão e Outono. (Fonte: DAEE/CTH).

## 4.2 Variáveis físicas e químicas da água

### 4.2.1 Temperatura da água

As variações na temperatura da água do rio Sorocabuçu são observadas na Figura 14 e, em cada estação, este parâmetro se mostrou bem definido, com temperaturas menores no inverno e maiores no verão, como o esperado de uma bacia com clima tropical. A menor temperatura observada foi de 14,5 °C no ponto R-05 durante o inverno e a maior foi de 27,2 °C no ponto R-01 no verão. Com exceção desta alta temperatura, o comportamento desse parâmetro foi crescente da nascente à foz do rio Sorocabuçu e apresentou uma variação aproximada de 3°C em cada campanha de amostragem. Observou-se também uma nítida variação sazonal de temperatura.

A entrada de efluentes pode afetar a temperatura da água e esta variação de temperatura pode afetar a atividade metabólica dos organismos (CETESB, 2011). Porém, o aumento gradual da temperatura (Figura 14) ao longo do rio foi devido à amostragem ao

longo do dia, conforme ocorreu também em outros trabalhos (Rios, 1993; Bubel, 1998; Moccellin, 2010), já que este rio não apresentou lançamentos pontuais de efluentes.

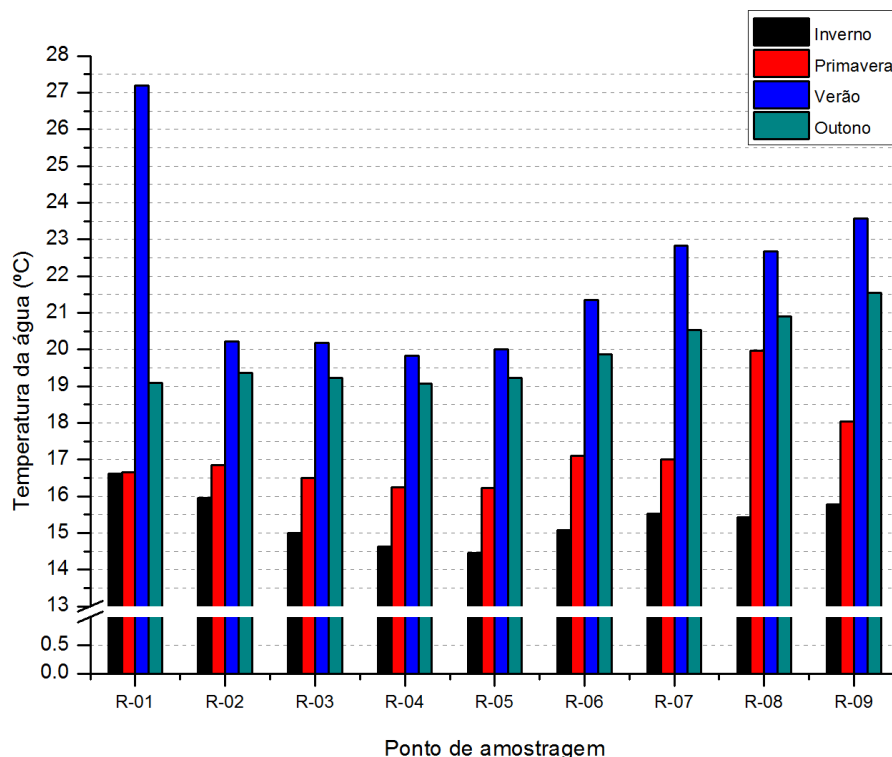


Figura 14 - Temperatura da água (°C) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.2.1 Potencial hidrogeniônico

A partir dos valores de pH observados no rio Sorocabaçu (Figura 15) pôde-se verificar que a variação deste parâmetro é baixa entre as amostras coletadas durante todo o período estudado (diferença máxima de 1,0). A resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) estabelece que um rio de Classe 2 deve apresentar pH entre 6 e 9 e o rio Sorocabaçu apresentou valores entre 5,4 (ponto R-09) e 6,4 (ponto R-07). Na maioria dos períodos e pontos de amostragem, o pH esteve abaixo de 6,0, o que indica uma característica levemente ácida deste rio.

Não foram observadas grandes variações no pH ao longo do rio, o que contribui para a indicação de que não há grandes influências antrópicas diretas, como fontes de poluição pontual, e sim que este parâmetro pode ser influenciado por variações sazonais, planícies de inundação, e principalmente pelo uso e ocupação do solo, na forma de poluição difusa. Vários

autores observaram variações no pH tanto de entrada de efluentes (Silva e Sacomani, 2000), passagem por zonas urbanas (Li et al, 2008), como referentes à sazonalidade (precipitação pluviométrica) (Evanson e Ambroge, 2006).

Cunha (2012), analisando o rio Sorocaba à montante do reservatório de Itupararanga, ponto referente ao R-09 desta pesquisa, observou maiores valores de pH, os quais variaram de 6,6 (junho de 2010) a 8,2 (fevereiro de 2010).

Moccellin (2010), quando analisou o rio Jacupiranguinha, encontrou valores altos de pH, variando de aproximadamente 7 à 11, porém estes foram devido às características da região do Vale do Ribeira, que apresenta áreas cársticas. Já no rio Pariquera-Açu, a mesma autora encontrou menores valores, variando de 5 à 7, provavelmente devido à presença de mata ciliar.

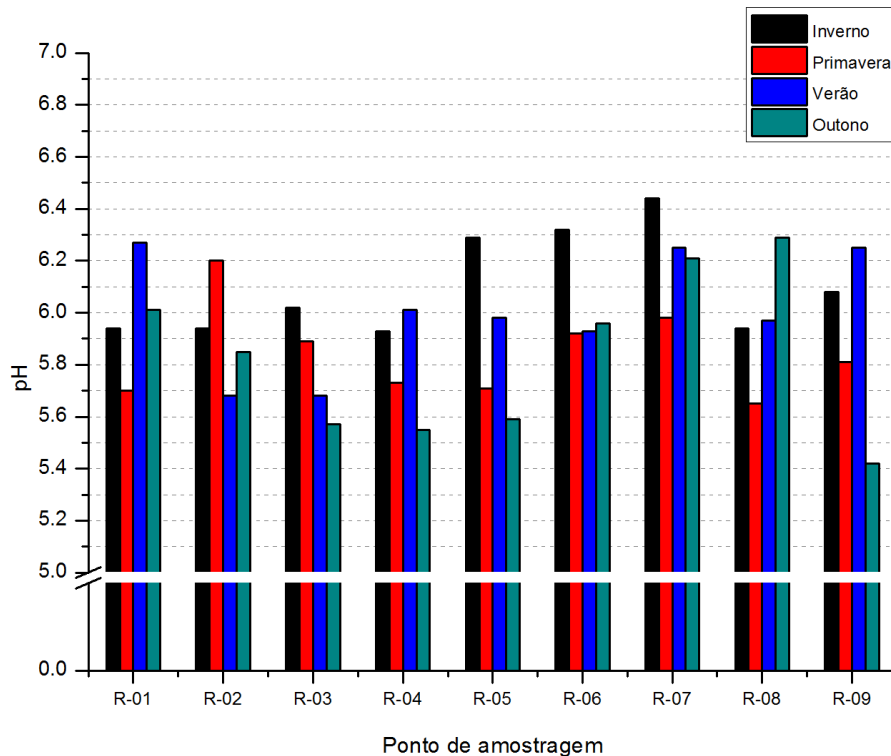


Figura 15 - pH nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocaba no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.2.1 Alcalinidade

A Figura 16 apresenta os valores de alcalinidade e notou-se que existiu um padrão no comportamento deste parâmetro para todas as estações avaliadas: ocorreu um aumento crescente destas concentrações partindo da nascente do rio Sorocaba até seu maior valor no

exutório do rio no ponto R-09. O valor mínimo ( $12,24 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ ) ocorreu na estação inverno no ponto R-01 e o máximo ( $58,45 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ ) no verão no ponto R-09.

A alcalinidade pode variar com a precipitação pluviométrica e com passagem por zonas urbanas. Os pontos R-08 e R-09 apresentaram aumento na alcalinidade, provavelmente devido à área de várzea próxima a este ponto, com influência do rio Sorocamirim e também do rio Una que, de acordo com Cunha (2012), é um rio com elevada influência antrópica, incluindo esgoto, resíduos sólidos e alteração na seção de escoamento do canal.

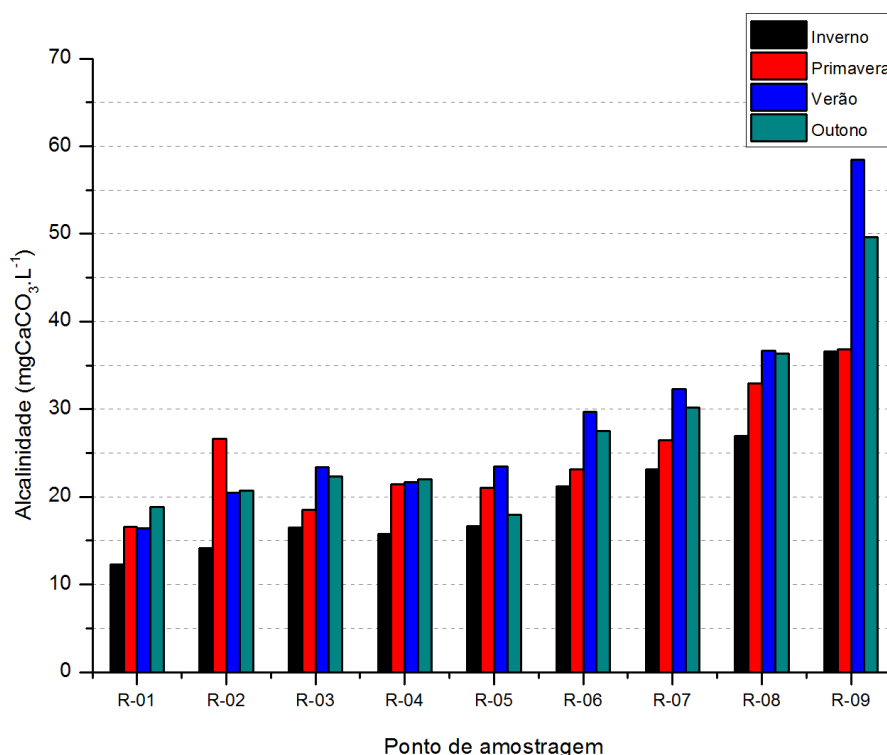


Figura 16 - Alcalinidade ( $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.2.1 Condutividade elétrica

A partir da Figura 17 nota-se que os valores de condutividade elétrica obtidos foram instáveis ao longo do rio devido ao escoamento superficial e ao fluxo de água. O menor valor encontrado foi de  $12 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  no ponto R-04 durante o outono e no verão atingiu  $275 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  em R-01 e R-03. No inverno e no outono, os valores de condutividade foram menores devido ao baixo escoamento superficial nessa época, conforme também descrito por Li et al. (2008),

estudando rio da China. Os maiores valores podem estar associados ao uso e ocupação do solo, como desmatamento para agricultura.

Variações na condutividade elétrica indicam mudanças na composição do corpo de água, aumentando à medida que mais sólidos dissolvidos são carregados para o rio e, em geral, valores superiores a  $100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  indicam ambientes impactados (CETESB, 2011). Sardinha e colaboradores (2008b) avaliaram o balanço de cátions e ânions nos rios da bacia do Alto Sorocaba e concluíram que o rio Sorocabaçu possui características mais próximas à um comportamento natural e que os valores de condutividade nos períodos chuvosos eram superiores aos secos. Notou-se então que houve uma interferência antrópica principalmente nos trechos próximos à nascente do rio Sorocabaçu, onde os valores oscilaram bastante, além de se tratar de uma região do município que não recebe o serviço de tratamento de esgoto doméstico, indicando um possível lançamento direto no corpo de água.

Ficou evidente a relação estreita entre o pH e o parâmetro condutividade elétrica (Figura 17), visto que os picos deste segundo parâmetro foram seguidos também pelo aumento do pH em mais de um ponto e em diferentes coletas, como observado no ponto R-02 na primavera, R-05 no inverno e R-08 no outono.

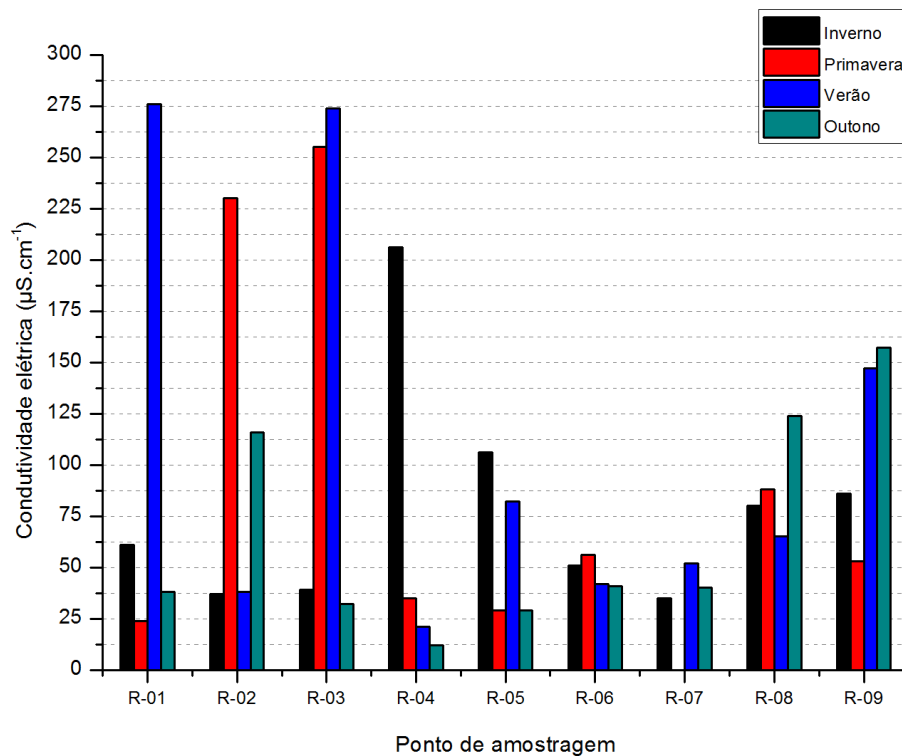


Figura 17 - Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.2.1 Sólidos suspensos totais

Através da Figura 18 observou-se que as concentrações de sólidos suspensos totais (SST) estiveram entre 5,00 e 15,00 mg.L<sup>-1</sup>. As menores concentrações podem estar associadas à presença de vegetação na bacia ou nas margens, a qual diminui a concentração de sólidos na água. No verão, ocorreram as maiores concentrações de SST nos pontos R-05 (36,12 mg.L<sup>-1</sup>), R-07 (35,45 mg.L<sup>-1</sup>) e R-09 (26,18 mg.L<sup>-1</sup>). Tais concentrações podem ser associadas à utilização do solo na região destes pontos, havendo a lavagem de hortaliças em R-05 e maior fluxo de pessoas e veículos em R-07 (área urbana); fato corroborado pelo estudo de Matsuda (2010), que encontrou resultados similares para este mesmo ponto coleta, no mesmo período hidrológico. Nas regiões mais lânticas, a sedimentação ocorre e as concentrações de sólidos diminuem como no caso dos pontos R-03 e R-04. Os problemas de desmatamento da mata ciliar, principalmente nos trechos que se localizam em planícies de inundação, foram discutidos por Callisto et al. (2005). A maior concentração de sólidos no período chuvoso também foi observada por Bordalo et al. (2001) na Tailândia, por Sardinha et al. (2008) em Leme - SP e por Moccellin (2010) nos rios Jacupiranguinha e Pariquera-Açu - SP.

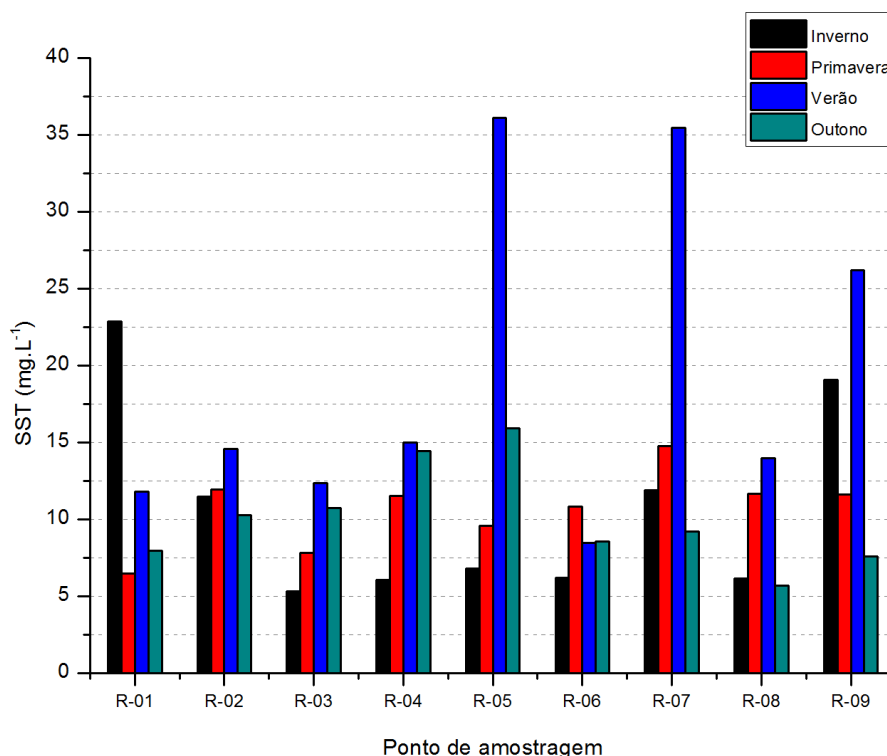


Figura 18 - Sólidos suspensos totais (mg.L<sup>-1</sup>) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

Em relação aos sólidos inorgânicos, na Figura 19, observou-se uma maior contribuição no rio, principalmente durante os meses mais chuvosos (primavera e verão), reflexo da

capacidade de erosão da bacia e do carreamento de material alóctone, conforme descrito por Jones e Knowlton (2005), também verificado por Rios (1993), Bottino (2008), Ferraz (2008), Cunha (2010) e Moccellini (2010) em estudos de sistemas lóticos no Estado de São Paulo. Na coleta de outono, houve uma contribuição maior de sólidos orgânicos nos pontos R-01 (57,0 %), R-02 (54,4 %), R-03 (49,6 %) e R-09 (49,9 %), o que era esperado pela apresentação de menores índices de precipitação durante este período com consequente diminuição na concentração de sólidos e turbidez no curso de água.

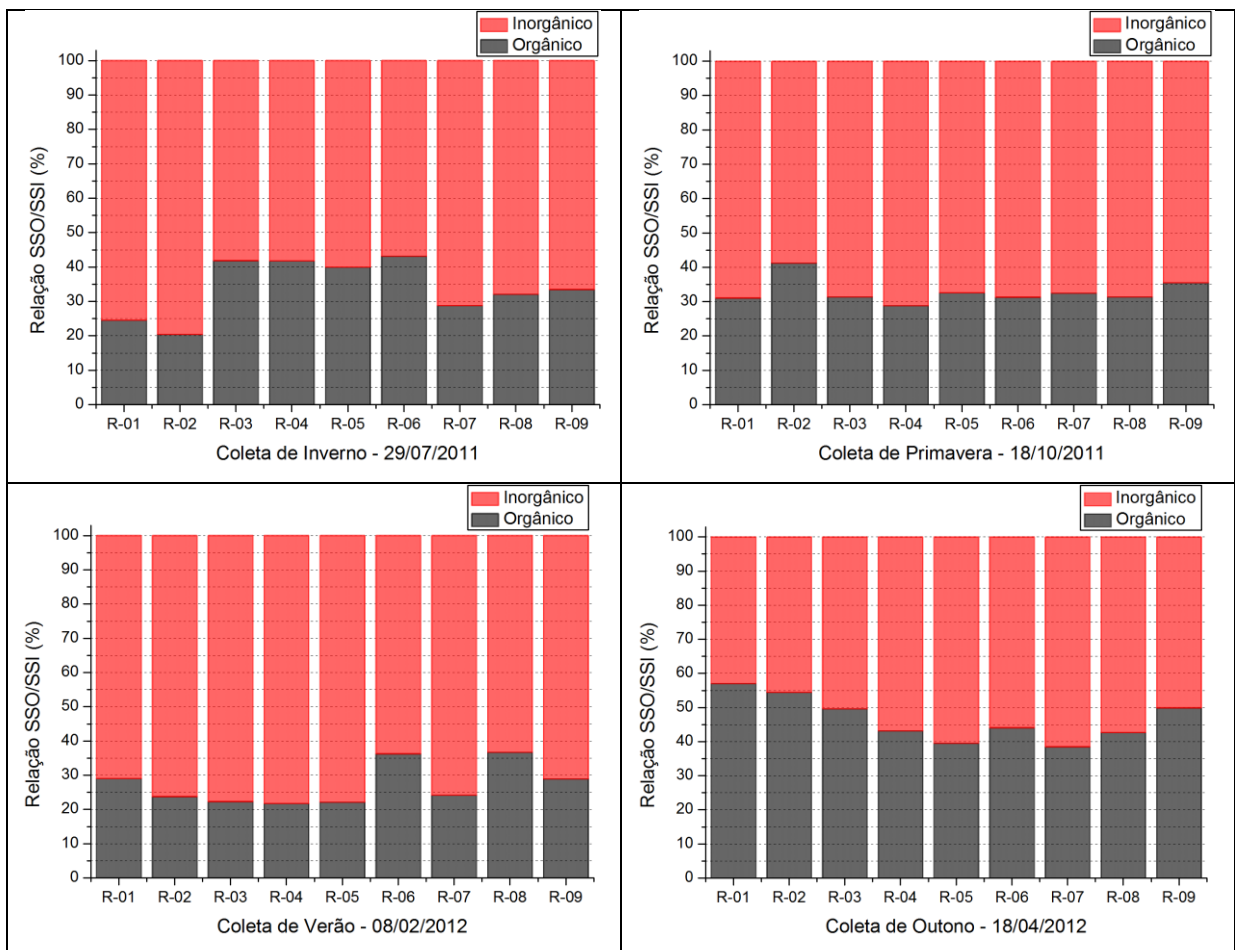


Figura 19 - Relação entre sólidos suspensos orgânicos e inorgânicos com sólidos suspensos totais (%) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.2.1 Turbidez

Em relação à turbidez, os maiores valores foram obtidos no período chuvoso. A Figura 20 aponta que o menor valor encontrado (8,14 uT) no ponto R-03 ocorreu na estação inverno

e o maior valor (48,7 uT) no ponto R-07 no verão. Com exceção desse valor máximo, as análises garantiriam o rio Sorocabuçu como classe I de acordo a resolução CONAMA 430/2001 (Brasil, 2011), pois os valores não superaram 40,00 uT.

Dado o uso e ocupação do solo e os valores de SST demonstrados anteriormente, verificou-se uma relação de variação direta com os valores de turbidez, principalmente em seus valores mais distintos no período sazonal do verão, além de um valor médio elevado durante a primavera quando comparado aos outros períodos. Isto pode ser justificado pelo maior arraste de partículas devido ao período de chuvas, uma vez que este parâmetro representa o grau de atenuação que um feixe de luz sofre ao atravessar a amostra de água.

Em 2011, Fernandes e colaboradores observaram na microbacia Glória, em Macaé - RJ, que apesar da ocupação e dos usos do solo nesta região contribuírem negativamente para os valores de turbidez e sólidos totais, o percentual de urbanização é muito baixo quando comparado às áreas de floresta secundária e pastagem, não comprometendo a qualidade hídrica, o que também pode ser notado na microbacia do rio Sorocabuçu.

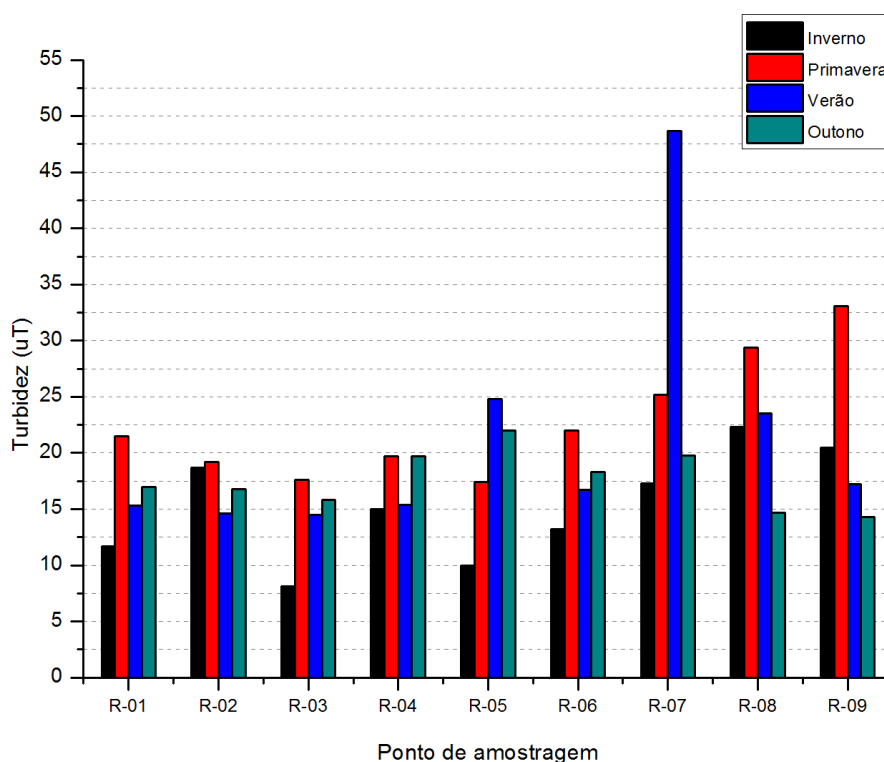


Figura 20 - Turbidez (uT) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.2.1 Oxigênio dissolvido

O rio Sorocabaçu apresentou elevados níveis de concentração de oxigênio dissolvido (OD) nas estações de primavera, verão e outono, com maiores concentrações na nascente e uma redução do ponto R-07 ao R-09 (Figura 21). Houve uma relação indiretamente proporcional entre a temperatura da água e as concentrações de oxigênio dissolvido em todos os períodos sazonais do rio Sorocabaçu, desta forma os maiores valores observados ocorreram durante a estação inverno, período marcado por menores temperaturas. Moccelin (2010) observou a mesma relação no rio Jacupiranguinha para o período de menor temperatura em seu trabalho.

Foi observada uma boa oxigenação do corpo de água, principalmente no inverno, com concentrações em torno de  $8,0 \text{ mg.L}^{-1}$ . Este fato também foi observado por Tudesque et al. (2008) na França. As concentrações de oxigênio dissolvido estiveram entre  $3,22 \text{ mg.L}^{-1}$  (R-09, na primavera) e  $9,35 \text{ mg.L}^{-1}$  (R-05, no inverno). Todas as concentrações de OD permaneceram acima da quantidade mínima estabelecida pela Resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) para rio de Classe 2 (acima de  $5 \text{ mg.L}^{-1}$ ), exceto em R-08 e R-09, na primavera, verão e outono. O decaimento da concentração de oxigênio dissolvido na água se dá pelo consumo do mesmo pelos microrganismos após o aumento da carga de nutrientes no sistema nos últimos pontos de amostragem, além da decomposição de macrófitas aquáticas presentes no local. Isso pode ser ainda mais representativo da superfície de alagamento no local, pois o mesmo resultado não se observou no período seco (inverno) e a menor concentração aconteceu no período chuvoso (primavera). Este comportamento nos pontos R-08 e R-09 evidenciam as influências da região de alagamento e dos outros afluentes na qualidade da água do rio Sorocaba (rios Una e Sorocamirim).

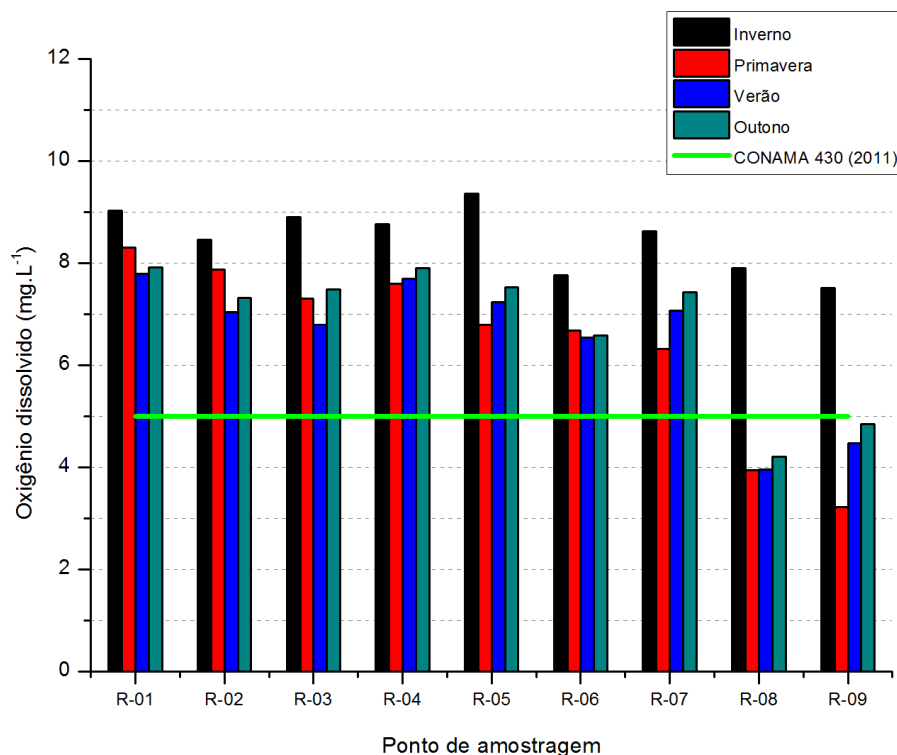


Figura 21 - Oxigênio dissolvido (mg.L<sup>-1</sup>) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.2.2 Série fosfatada

As fontes naturais de fósforo são, principalmente, a intemperização de rochas e a decomposição da matéria orgânica. O fósforo é responsável pelo controle da produção primária em um corpo de água, podendo ser limitante para o crescimento de algas (CÂMARA; LIMA; ZÁKIA, 2006). Os autores (op. cit.) citam que em regiões de cabeceira as concentrações deste parâmetro são bastante variáveis, devido principalmente à decomposição da matéria orgânica proveniente de áreas adjacentes. Este fato pode ser observado no comportamento de toda a série de fósforo.

A menor concentração de fósforo total (5,88  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) ocorreu durante a estação inverno no ponto R-01, adotado como nascente do rio Sorocabaçu, enquanto a maior concentração (99,03  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) ocorreu durante a estação verão no ponto R-07, primeiro ponto do percurso situado em área urbana do município de Ibiúna (Figura 22).

O comportamento deste parâmetro no rio Sorocabaçu foi de aumento de seus valores partindo da nascente até a foz, apresentando picos nas concentrações em alguns pontos durante os períodos chuvosos (primavera e verão), de maneira contrária ao que foi verificado

nos estudos de Ferraz (2008) e Moccellin (2006). Sasaki et al. (2005) obtiveram maiores concentrações de fósforo total em regiões de entrada de esgoto e atividades agrícolas. As altas concentrações nos pontos R-08 e R-09 podem estar relacionadas à decomposição de macrófitas aquáticas, já que estes pontos são localizados em área de várzea, e à contribuição do rio Una, que é bastante impactado de acordo com Cunha (2012), pois recebe efluentes da ETE de Ibiúna e apresenta influência direta da área urbana.

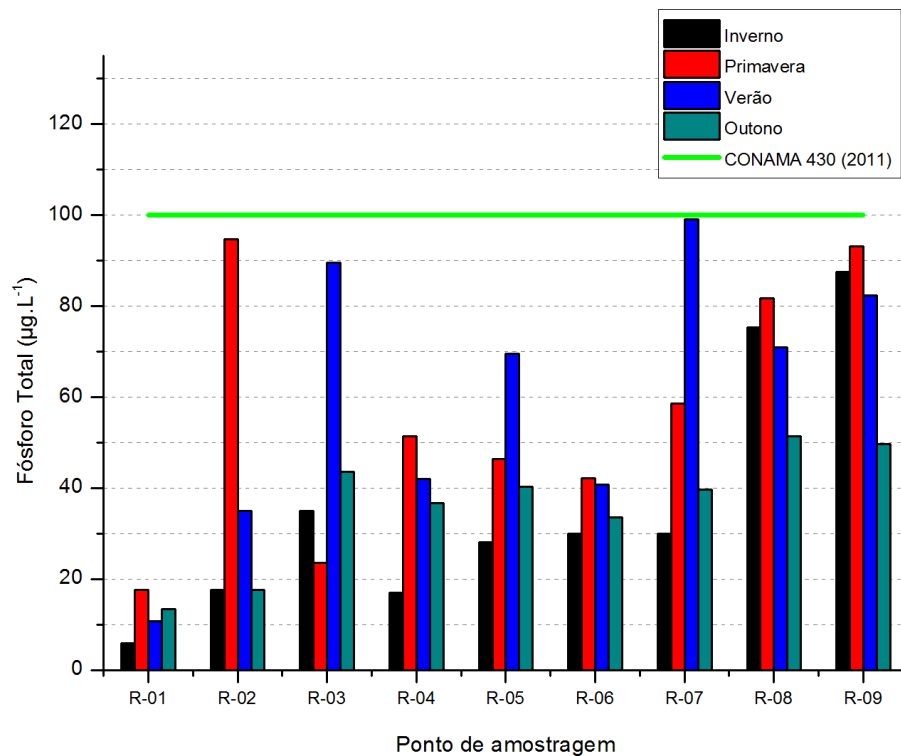


Figura 22 - Fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

As concentrações mínima de fósforo total dissolvido ( $4,22 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) e máxima ( $85,53 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) observadas na Figura 23 ocorreram nas estações inverno e verão, nos pontos R-01 e R-03, respectivamente. Cunha (2012) obteve concentração de fosfato total dissolvido no rio Una de  $192,0 \mu\text{g.L}^{-1}$  e no rio Sorocaba (referente ao ponto R-09 desta pesquisa) de  $105,6 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Estes resultados corroboram o impacto observado do rio Una no rio Sorocabaçu, aumentando as concentrações no ponto R-09.

A partir da Figura 24, nota-se que a menor concentração de ortofosfato ( $1,75 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) ocorreu na estação de outono no ponto R-01, enquanto a maior ( $51,44 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) aconteceu na estação primavera no ponto R-02.

A principal forma de fosfato assimilada por organismos aquáticos é o ortofosfato. Os valores elevados deste parâmetro no trecho inicial do rio Sorocabaçu refletem a sensibilidade destes pontos aos interferentes antrópicos, uma vez que o volume de água medido até o ponto R-04 é bastante inferior em relação aos pontos seguintes. De maneira geral, as concentrações aumentaram da nascente a foz, conforme também verificado por Ferraz (2008) no rio Canha – SP. Porém, no ponto R-03 observou-se uma interrupção neste padrão, com picos durante três das quatro coletas que pode ter ocorrido pela proximidade do ponto de coleta com uma pequena propriedade rural, que pode ter contribuído com nutrientes fosfatados decorrente da agricultura intensiva.

De acordo com CETESB (2011), a descarga de esgotamento sanitário é a principal responsável antrópica nas águas naturais. A poluição principal que ocorre no rio Sorocabaçu é difusa e proveniente de esgotamento sanitário e da utilização de fertilizantes na agricultura, de modo que as concentrações de fósforo no rio se comportam conforme esperado, com maior impacto e contribuição próximo à vilarejos e também no ponto R-09, que recebe efluente da ETE de Ibiúna. Mesmo assim, as concentrações encontradas respeitam as condições impostas pela Resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) para rios de Classe 2.

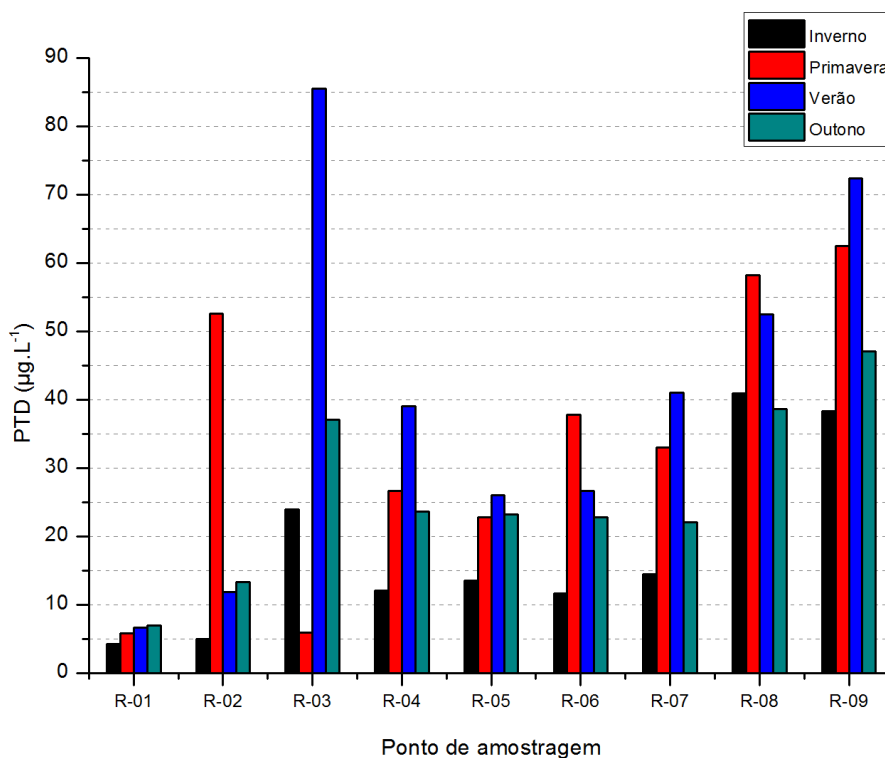


Figura 23 - Fósforo total dissolvido ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

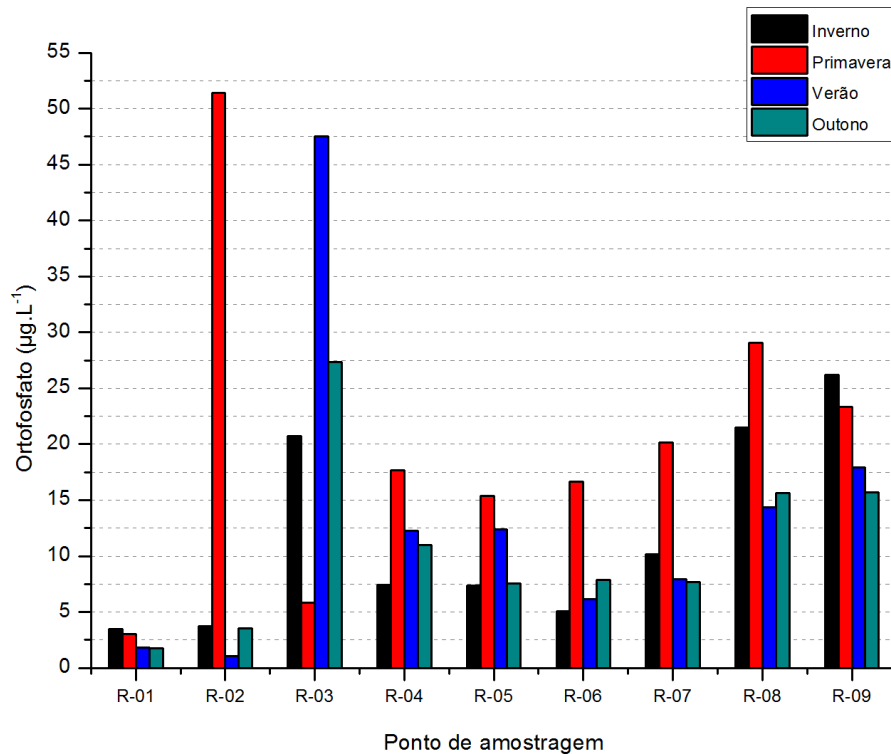


Figura 24 - Ortófosfato ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

### 4.2.3 Série nitrogenada

O nitrogênio é responsável pela constituição das proteínas e material genético, sendo essencial para os organismos vivos. As plantas e microrganismos convertem nitrogênio inorgânico em formas orgânicas (CÂMARA; LIMA; ZÁKIA, 2006) de acordo com seus estados de oxidação (nitrato, nitrito e íon amônio). A partir do processo de autodepuração, este estado do nitrogênio é alterado, sendo possível desta forma perceber em que fase deste processo o corpo de água se encontra.

Ferraz (2008) verificou em seu estudo do rio Canha – SP maiores concentrações de nitrogênio total Kjeldahl no período de menor precipitação e atribuiu este resultado ao menor efeito de diluição deste parâmetro pela menor quantidade de chuvas durante o período indicado (outono). Observou-se a partir da Figura 25 que o rio Sorocabaçu teve um comportamento oposto com a menor concentração de NTK ( $0,003 \text{ mg.L}^{-1}$ ) verificada na estação outono no ponto R-06 e a maior ( $1,69 \text{ mg.L}^{-1}$ ) na estação primavera (período mais chuvoso) no ponto R-02. Na maioria dos pontos, as concentrações de NTK ficaram abaixo de  $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$ .

Benedetti et al. (2008), estudando um rio na Bélgica, concluiu que o nitrogênio total advém de pastagens e agricultura. No rio Sorocabaçu fica nítido a contribuição deste tipo de uso e ocupação, principalmente no período que ocorreu as maiores precipitações nos dias próximos à coleta (primavera) e conseqüentemente maior carreamento de nutrientes para dentro do rio.

As concentrações deste parâmetro não seguem um padrão específico para cada período hidrológico, cada corpo de água apresenta características distintas e alguns autores obtiveram maiores concentrações de nitrogênio no período chuvoso (Drewry et al., 2009; Judová e Jansky, 2005) e outros menores concentrações (Bechmann et al., 2008; Benedetti et al., 2008).

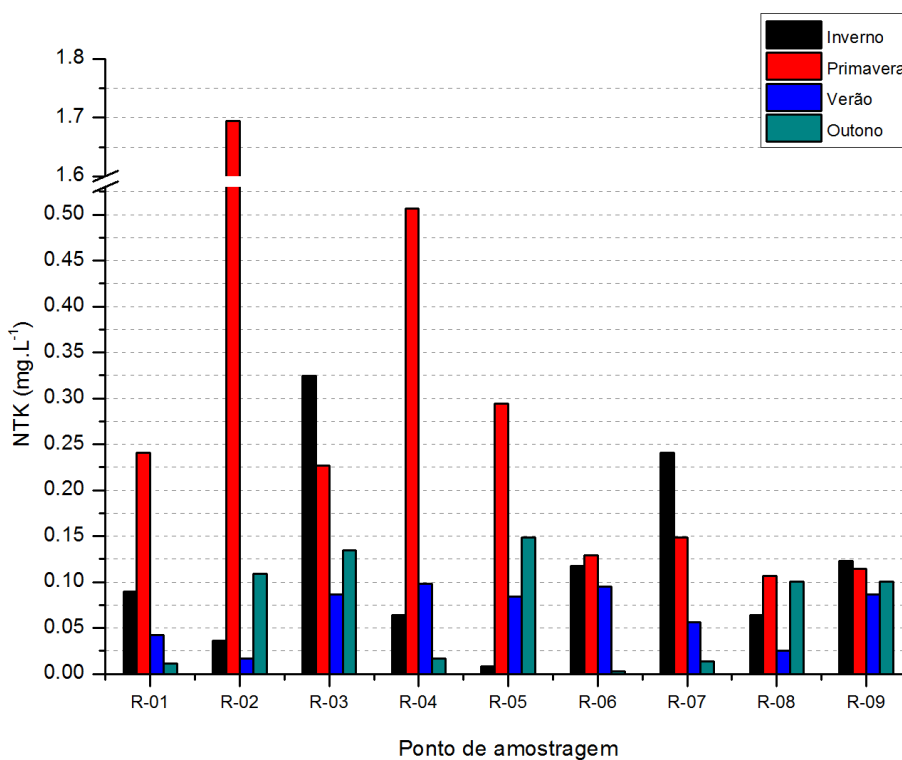


Figura 25 - Nitrogênio total Kjeldahl ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

O nitrito é uma forma transitória e se converte rapidamente em nitrato quando o ambiente está oxigenado. Por conseqüência disto, sua presença nas águas indica a existência de uma contribuição de matéria orgânica próxima ao local amostrado (CUNHA, 2010) e, sendo assim, pode ser considerado indicador de águas poluídas (BOTTINO, 2008). Na Figura 26, observa-se que a menor concentração de nitrito ( $0,19 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) ocorreu na estação verão no ponto R-02 e a maior ( $91,82 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) na estação primavera no ponto R-03. Estas concentrações máxima e mínima de nitrito ocorreram em ambos no período chuvoso, porém a data nas quais

ocorreram as precipitações para cada caso podem ter sido fatores decisivos para estes resultados. Os valores de nitrito se encontraram abaixo do valor limite de  $1.000 \mu\text{g.L}^{-1}$  estabelecida pela resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) para rios de Classe 2. As concentrações durante o verão apresentaram valores mais de cem vezes menores que esta norma, o que pode estar associado à velocidade das reações de oxidação biológica do nitrito devido às maiores temperaturas observadas neste período em conjunto com os valores elevados de oxigênio dissolvido apresentados pelo rio Sorocabuçu.

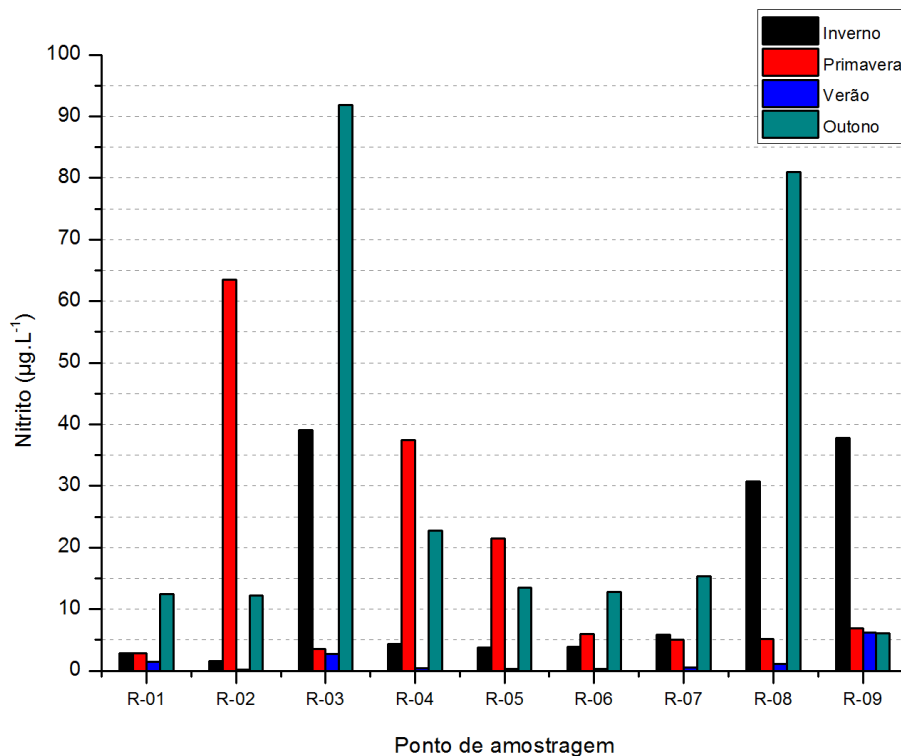


Figura 26 - Nitrito ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

Observou-se um aumento nas concentrações de nitrato em direção à foz (Figura 27), com menor valor ( $0,43 \text{ mg.L}^{-1}$ ) observado na estação outono no ponto R-01, enquanto o maior ( $1,81 \text{ mg.L}^{-1}$ ) ocorreu na estação primavera no ponto R-08, comportamento similar ao encontrado por Bottino (2008). As maiores concentrações deste parâmetro foram verificadas durante o período mais influenciado pelas chuvas (primavera), porém nenhuma concentração foi superior a 20% do valor máximo permitido pela resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011). Cunha (2012) obteve concentração máxima de nitrato de  $1,5 \text{ mg.L}^{-1}$  nos rios que antecedem o reservatório, Una e Sorocabuçu. Segundo o autor, a presença desta variável pode estar associada ao lançamento de efluentes.

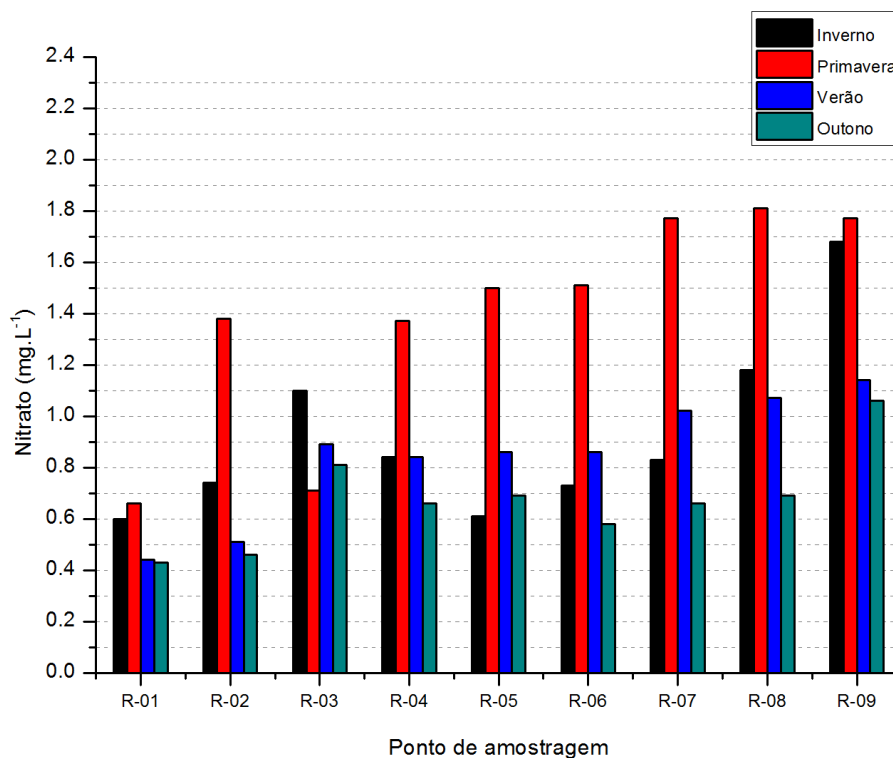


Figura 27 - Nitrato ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.2.4 Carbono total

Verificou-se através das Figuras 28 e 29 as concentrações de carbono no rio Sorocabaçu e a variação entre a predominância de orgânicos e inorgânicos.

Ocorreu um aumento na concentração de carbono da nascente à foz do rio Sorocabaçu, o que pode ser um indício de exportação de carbono para o rio Sorocaba e para o reservatório de Itupararanga. Ecossistemas lóticos são sistemas abertos, ocorrendo uma importação de carbono no alto curso do rio e uma para a sua foz, com trocas laterais substanciais onde o rio é influenciado por planícies de inundações (ALLAN; CASTILLO, 2009). Os resultados encontrados no rio Sorocabaçu corroboram esta afirmação, ocorrendo um aumento na concentração de carbono desde o ponto R-01 até o ponto R-09 (rio Sorocaba), apresentando maiores concentrações no ponto de maior influência da superfície de alagamento (R-08).

Outras pesquisas também verificaram este aumento nas concentrações de carbono em rios europeus e norte americanos e associaram os resultados às variáveis climáticas, principalmente relacionadas aos regimes pluviais, onde as maiores concentrações de carbono ocorreram em períodos mais chuvosos, consequência do arraste de material alóctone para os

rios (HOPE; BILLET ; CRESSER, 1993 e 1996). Estes autores observaram maiores sensibilidade à essas variações em rios menores como também pôde ser observado neste estudo para o rio Sorocabuçu. Notou-se também que, durante o verão, não se observou a predominância de carbono orgânico como nas outras coletas, refletindo o maior consumo dos compostos orgânicos, ou seja, maior atividade microbológica corroborada provavelmente pela maior disponibilidade de radiação solar e temperatura da água nesta estação.

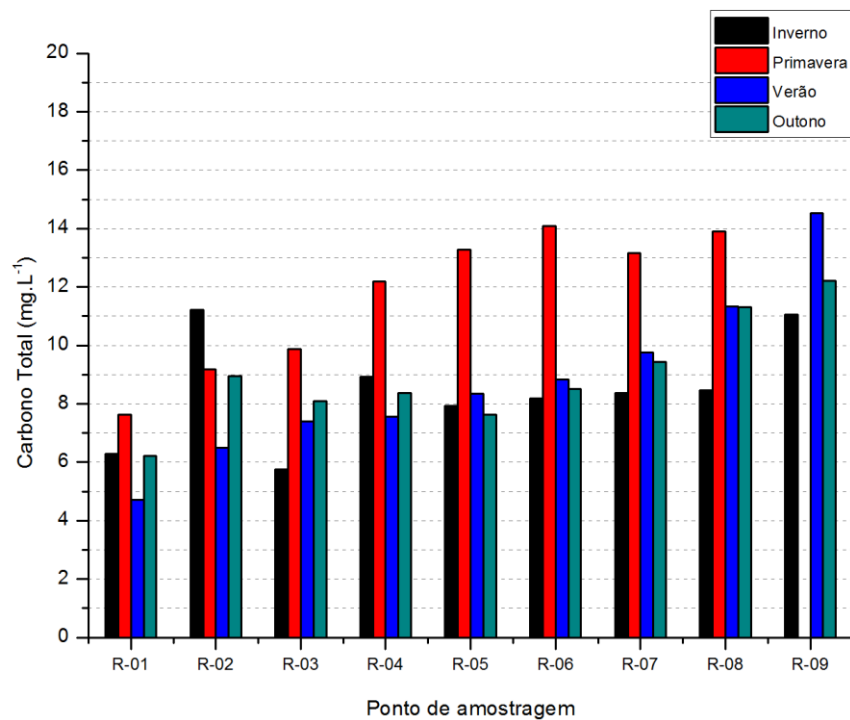


Figura 28 - Carbono total ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

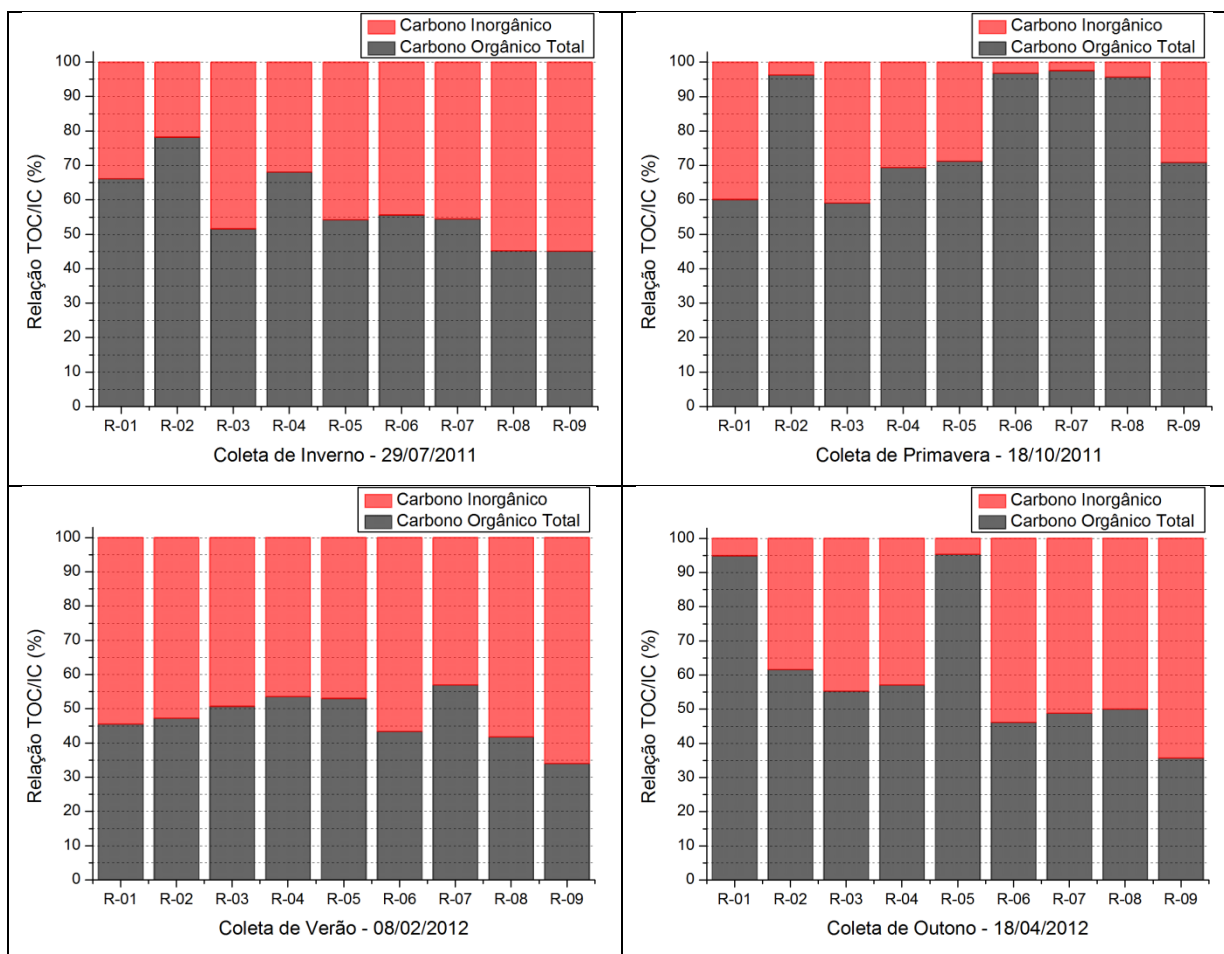


Figura 29 - Relação entre carbono orgânico e inorgânico com carbono total (%) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

### 4.3 Variáveis biológicas da água

#### 4.3.1 Clorofila-*a* e feofitina

As concentrações de clorofila-*a* observadas no rio Sorocabaçu a partir da Figura 30 respeitam o limite de  $30,0 \mu\text{g.L}^{-1}$  estabelecido pela Resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2005) para rios de Classe 2. Em alguns pontos não foram detectadas as concentrações (R-03 e R-09) e o maior valor observado ( $27,6 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) ocorreu no ponto R-02 nas estações inverno e primavera, respectivamente. Observou-se também que, com exceção da amostragem de inverno e um pico ocorrido na primavera, as concentrações se mantiveram abaixo de  $7,0 \mu\text{g.L}^{-1}$  na sua maioria. Cunha (2012) não observou padrão sazonal de clorofila-*a* no ponto analisado do mesmo rio.

Em relação à feofitina (Figura 31), as menores concentrações encontradas foram na estação de inverno, variando de ‘não detectável’ à  $0,36 \mu\text{g.L}^{-1}$  no ponto R-06, e os maiores encontrados na estação outono e no ponto R-02 na primavera ( $12,2 \mu\text{g.L}^{-1}$ ).

A avaliação destes parâmetros é de grande utilidade em programas de monitoramento de qualidade de água, servindo de base para determinação do índice de estado trófico, por exemplo. Lamparelli (2004) ressalta que deve-se fazer a correção do valor de clorofila-*a* através da determinação de feofitina para não ocorrer a superestimativa do IET e que estes parâmetros estão correlacionados com o tempo de residência no curso de água, sendo que em ambientes com corpos de água lânticos, como reservatórios, os valores são geralmente superiores aos de ambientes lóticos.

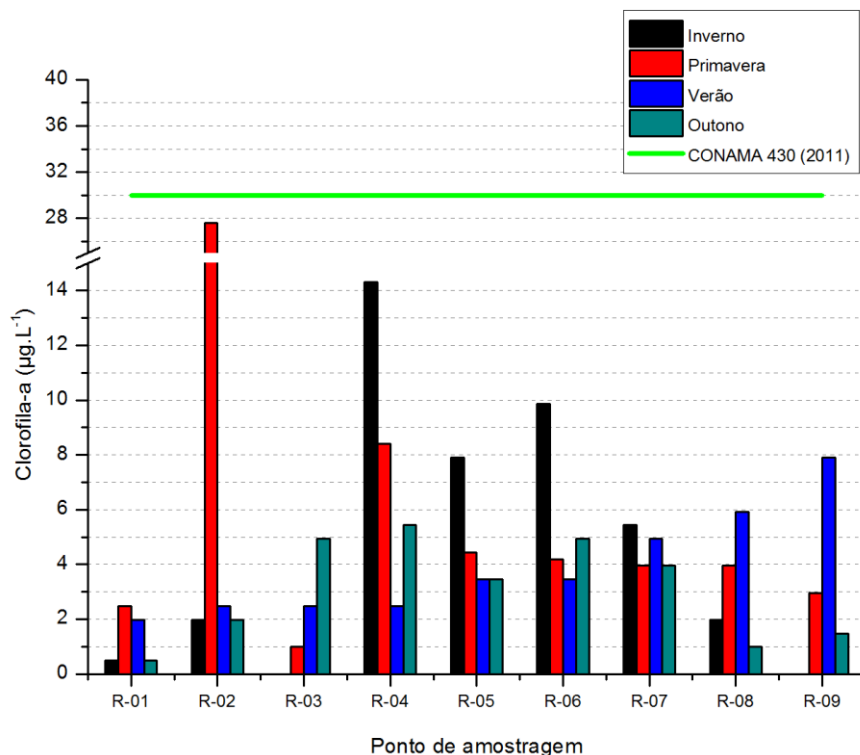


Figura 30 - Clorofila-*a* ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

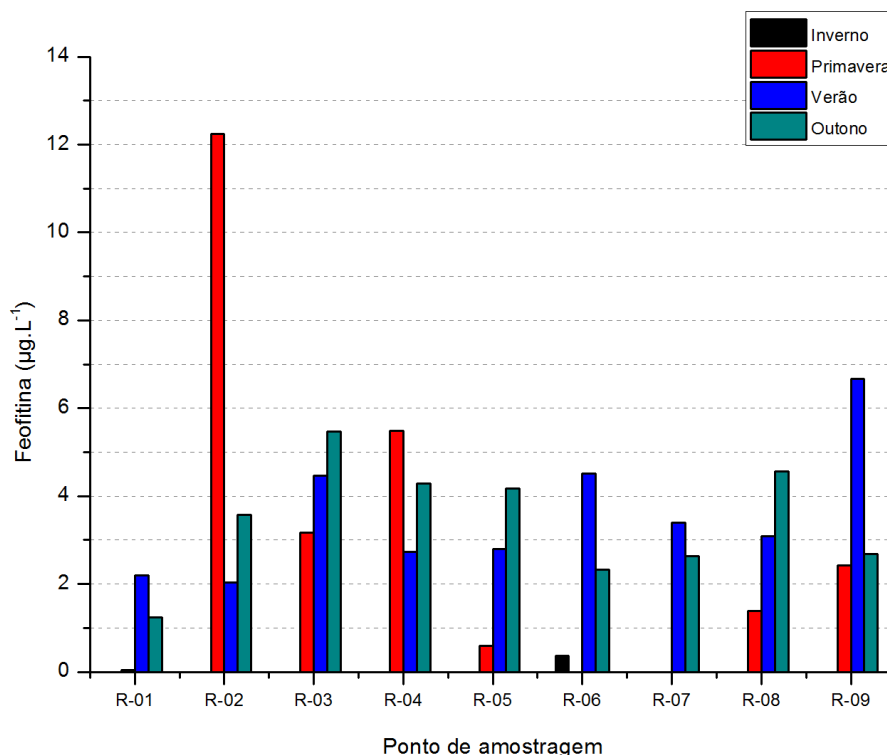


Figura 31 - Feofitina ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.4 Resultados da análise dos sedimentos do rio Sorocabaçu

O sedimento em ecossistemas aquáticos é caracterizado por possuir grande quantidade de nutrientes devido a sua capacidade de retenção de metais, pesticidas e processos metabólicos de uma região, sendo importante a realização de análises físico-químicas deste compartimento para o controle de poluições (BENASSI, 2002; FERRAZ, 2008). Desta maneira, a composição dos sedimentos em sistemas lóticos pode ser relacionada às características de uso e ocupação da bacia hidrográfica.

De maneira geral, a variação espacial dos parâmetros analisados de sedimento (fósforo, nitrogênio e matéria orgânica) apresentou um mesmo comportamento para o rio Sorocabaçu, apresentando valores baixos no alto e médio curso do rio e picos no baixo curso a partir do ponto R-07 (Figura 32, Figura 33 e Figura 34). Os maiores valores foram registrados durante as coletas referentes ao período seco, como foi verificado também por Ferraz (2008) no rio Canha – SP. A descrição das concentrações máximas e mínimas para cada uma destas variáveis foram discutidas nos sub-itens abaixo.

#### 4.4.1 Fósforo do sedimento

Observou-se variação espacial no rio Sorocabuçu, com aumento das concentrações de fósforo dos pontos R-05 em diante (Figura 32). A máxima concentração obtida foi  $1,1 \mu\text{g.g}^{-1}$  em R-04. Este ponto é um dos mais preservados, porém, com as maiores chuvas no período da primavera, o sedimento pode ter sido carregado de pontos anteriores. Os picos observados nos pontos R-05 e R-06 (verão) em relação aos valores das outras estações e ao comportamento que o rio seguia para esta variável podem ser explicados pela relação com as máximas de sólidos suspensos totais nos mesmos pontos, pelas altas concentrações de oxigênio dissolvido e pelos valores mais ácidos no pH, que se relacionaram de modo que a capacidade de adsorção e precipitação de fósforo no sedimento se potencializou (KOSKI-VÄHÄLÄ; HARTIKAINEN, 2001).

O ponto R-07 é o que se posiciona mais próximo da área urbana de Ibiúna, recebendo contribuição de fosfatos pela microdrenagem urbana deste município, que segundo SSE-CSAN (2010) apresenta diversas irregularidades com relação à drenagem de água pluvial, dimensionamento e localização das bocas-de-lobo, o que corrobora o aumento da concentração destavariável neste ponto.

Nos pontos R-08 e R-09 eram esperadas maiores concentrações devido a influência do rio Una e a própria sedimentação que provavelmente ocorreria nestes pontos, visto que estes tem características de ambientes lênticos e recebem um aporte maior de nutrientes advindos da área de alagamento.

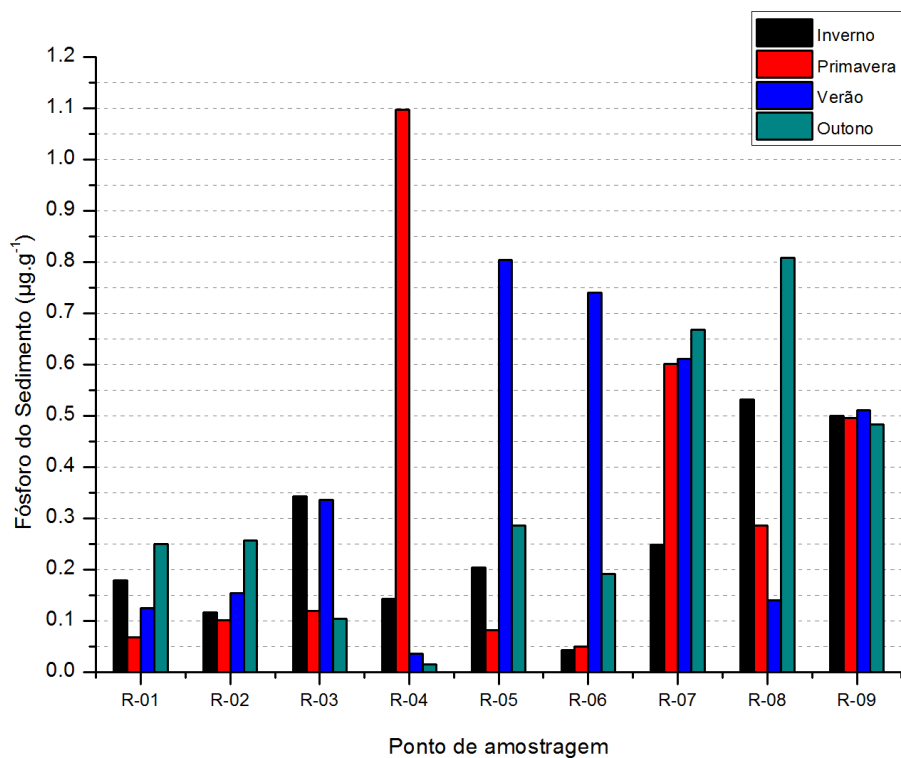


Figura 32 - Fósforo do sedimento ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabuçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono..

#### 4.4.2 Nitrogênio do sedimento

As concentrações de nitrogênio total no sedimento variaram de  $0,08 \mu\text{g.g}^{-1}$  em R-01 (verão) até  $7,92 \mu\text{g.g}^{-1}$  e  $7,84 \mu\text{g.g}^{-1}$  em R-08 (outono) e R-09 (inverno), respectivamente (Figura 33). As maiores concentrações de nitrogênio total no sedimento durante os períodos sazonais secos podem ser atribuídos às menores resuspensões do sedimento devido às menores precipitações registradas. Campagna (2005) e Ferraz (2008) também verificaram em seus estudos este comportamento.

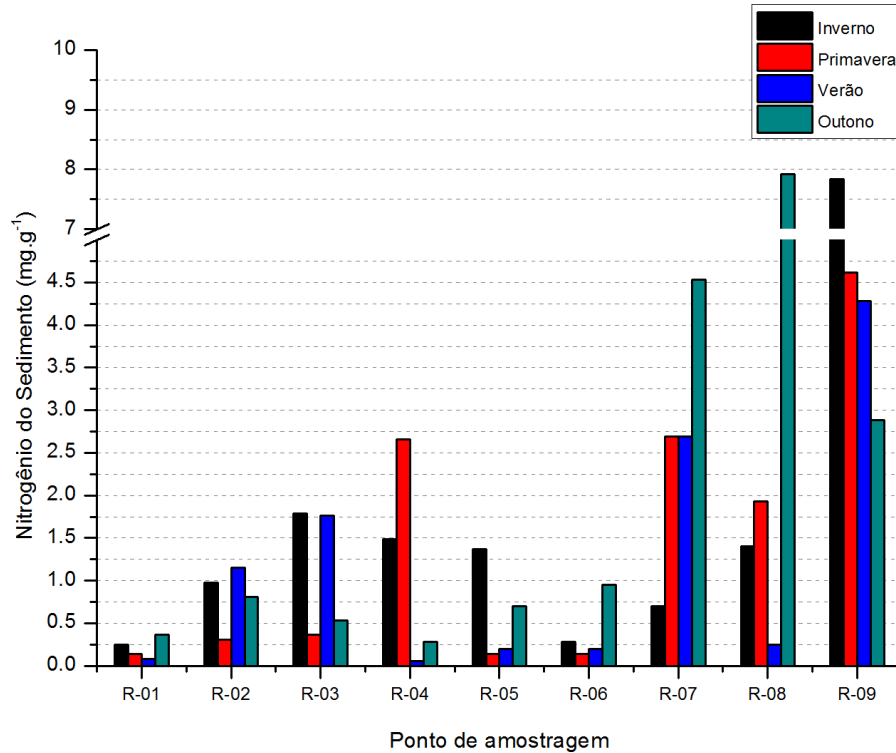


Figura 33 - Nitrogênio do sedimento ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

#### 4.4.3 Matéria orgânica do sedimento

De acordo com o teor de matéria orgânica presente do sedimento, este pode ser considerado como orgânico ou inorgânico/mineral (CUNHA, 2010). A autora (op. cit.) verificou que o teor apresentado no rio Jacupiranga –SP foi inferior a 10% e, portanto, poderia ser caracterizado como mineral. Tal conclusão também foi obtida por Cunha et. al. (2009) nos rios Canha, Pariquera-Açu e Jacupiranguinha. De maneira geral, o rio Sorocabaçu apresentou comportamento mineral (Figura 34), com valores percentuais de matéria orgânica do sedimento variando de 0,5% em R-04 (verão) a 8,9% em R-07 (outono). Cunha (2012) analisando o rio Sorocabaçu observou que o sedimento do rio foi classificado como mineral, devido o maior fluxo e arraste de partículas.

Os valores referentes ao ponto R-09 já consideram a entrada do rio Sorocamirim e Una, constituindo o rio Soracaba, sendo este sedimento considerado orgânico (maior do que 10%), conforme descrito em Cunha (2010). Os picos observados durante a primavera e o verão e nos pontos R-04 (8,6%) e R-05 (21%), respectivamente, podem ser atribuídos ao aumento do teor de sólidos suspensos e possível revolvimento dos nutrientes em decorrência

da maior vazão nestas estações, além da contribuição de material alóctone nesta região rural do município.

O percentual de matéria orgânica no sedimento também pode ser explicado pelas altas concentrações de oxigênio dissolvido durante os pontos de coleta analisados. Este parâmetro apresentou uma relação indiretamente proporcional com a matéria orgânica do sedimento, representando, provavelmente, a influência das reações de oxidação biológica e respiração da comunidade biológica aquática no consumo de oxigênio e nutrientes no perfil longitudinal do rio.

Foram esperados maiores teores de matéria orgânica do sedimento na área de nascente, como observado por Cunha et. al. (2009) nos rios Pariquera-Açu e Canha. A presença de mata ciliar e a decomposição de folhas e galhos tendem a aumentar este percentual, porém foi observado no rio Sorocabaçu a preservação das regiões próximas ao rio, com redução desta somente em locais próximos a área urbana, conforme descrito nos pontos de amostragem. Com isso, a região de nascente não apresentou uma variação significativa em relação ao alto e médio curso do rio Sorocabaçu. O aumento da porcentagem de matéria orgânica verificado pode ser atribuído à planície de inundação em que se encontra o ponto R-08 e às contribuições do rio Sorocamirim e Una antes do ponto de coleta R-09, com contribuição da mesma forma como era esperado pelo ponto de nascente.

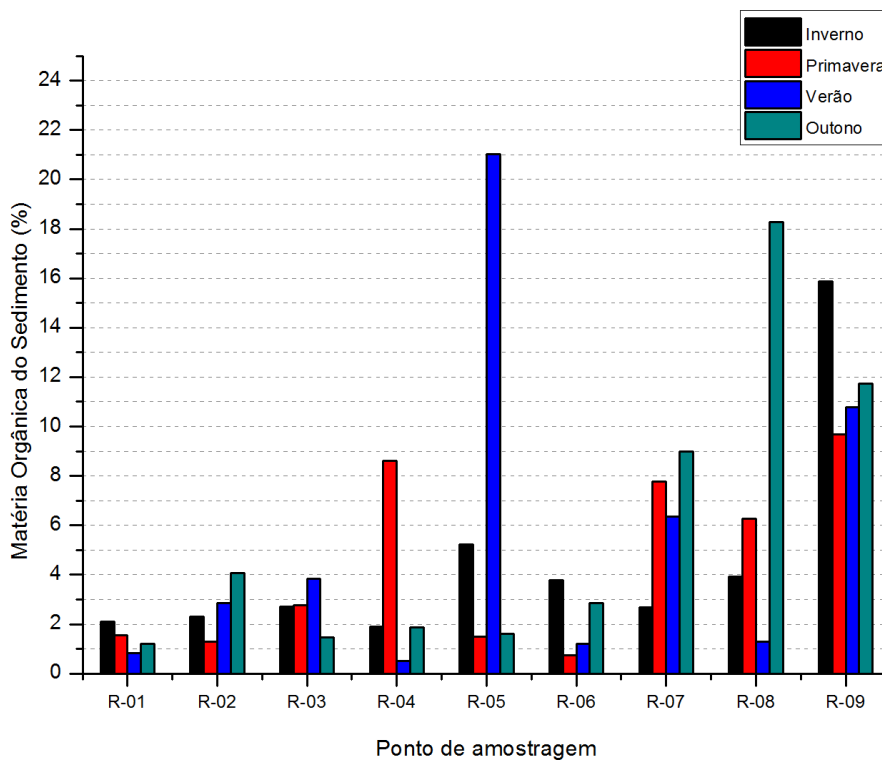


Figura 34 - Matéria orgânica do sedimento (%) nos diferentes pontos de amostragem no rio Sorocabaçu no Inverno, Primavera, Verão e Outono.

## **4.5 Calibração do modelo QUAL2Kw para o rio Sorocabuçu**

Foi feita a calibração do modelo QUAL2Kw com os dados obtidos nas quatro amostragens realizadas e através da estimação da poluição difusa, onde obteve-se a formulação do cenário 0 e, a partir desta validação foi possível gerar os cenários propostos. A etapa de calibração e validação do cenário 0, juntamente com os dados observados nas coletas de inverno e primavera de 2011 e verão e outono de 2012 são apresentados a seguir.

### **4.5.1.1 Calibração das variáveis referente a coleta de inverno (29 de julho de 2011)**

As Figuras 35, 36, 37 e 38 apresentam as simulações de nitrato, nitrogênio total, fósforo total, oxigênio dissolvido e sólidos suspensos totais com os dados coletados durante o inverno de 2011. Observou-se uma maior diferença entre os valores observados e simulados para nutrientes entre os pontos R-03 e R-07. Quanto ao oxigênio dissolvido, as maiores divergências entre a simulação e os dados observados ocorreram entre os pontos R-01 e R-03 e no trecho que vai de R-06 à R-07. Em relação aos sólidos suspensos totais, os pontos R-03 e R-08 ficaram notavelmente fora da curva de calibração, provavelmente devido as maiores variações de concentração desta variável em intervalos curtos de espaço.

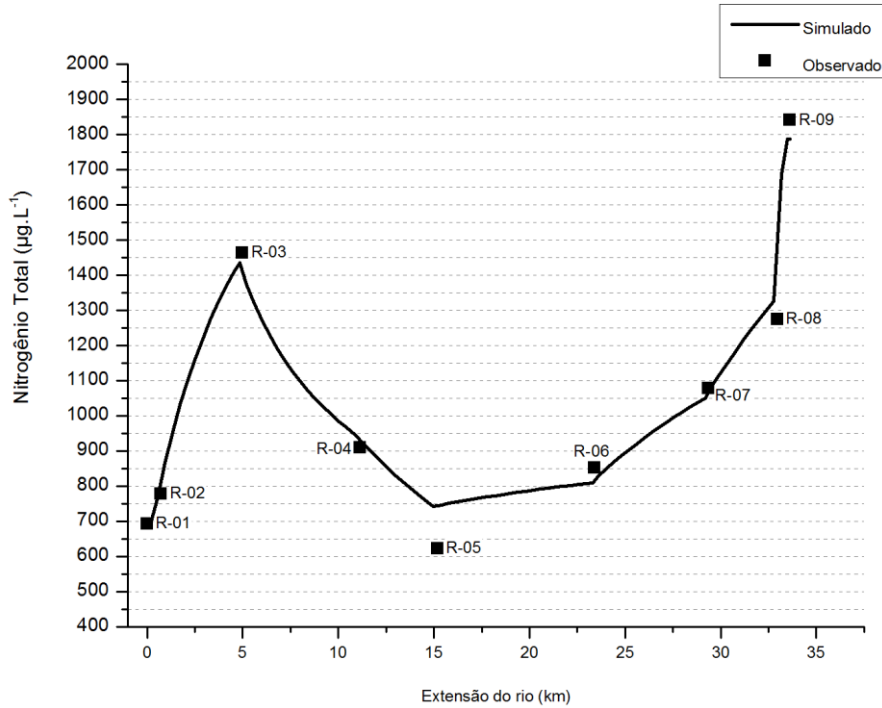


Figura 35 - Curva de calibração da concentração de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de inverno de 2011 no rio Sorocabaçu.

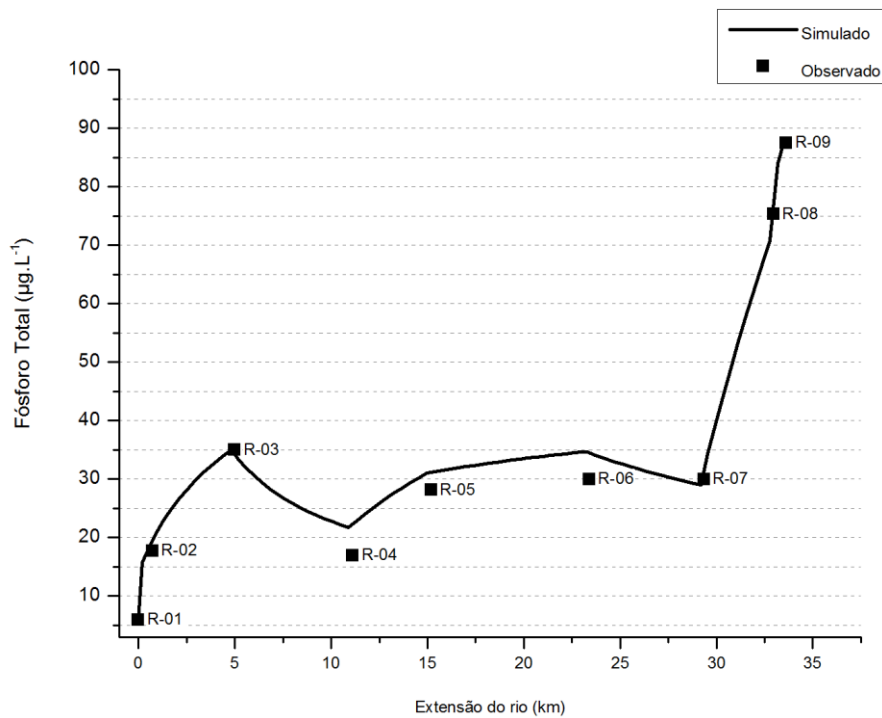


Figura 36 - Curva de calibração da concentração de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de inverno de 2011 no rio Sorocabaçu.

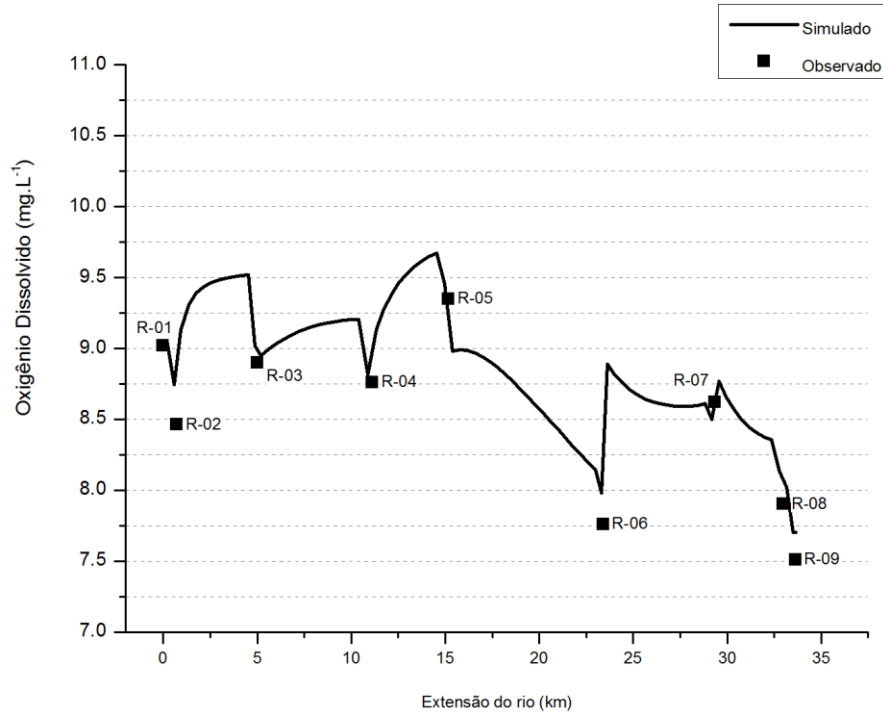


Figura 37 - Curva de calibração da concentração de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de inverno de 2011 no rio Sorocabaçu.

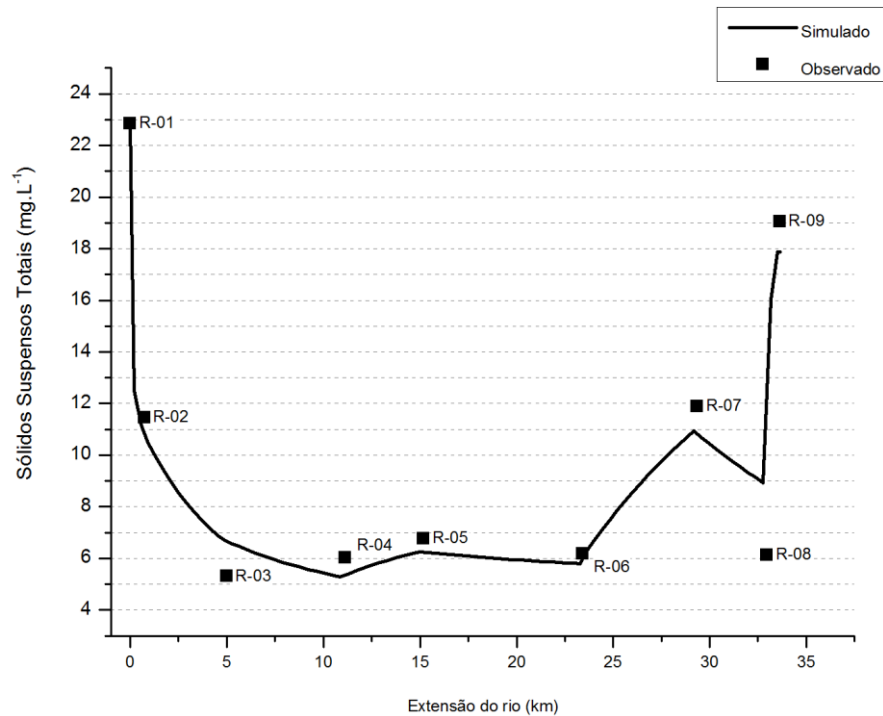


Figura 38 - Curva de calibração da concentração de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de inverno de 2011 no rio Sorocabaçu.

#### 4.5.1.1 Calibração das variáveis referentes a coleta de primavera (18 de outubro de 2011)

As Figuras 39, 40, 41 e 42 apresentam as simulações de nitrato, nitrogênio total, fósforo total, oxigênio dissolvido e sólidos suspensos totais com os dados coletados durante a primavera de 2011. Na calibração das variáveis de nutrientes, somente o ponto R-03 ficou mais distanciado da curva de simulação, logo após um grande pico nas concentrações de nutrientes em R-02, o que também influenciou na calibração de oxigênio dissolvido, onde o ponto R-02 ficou fora da curva de simulação. A simulação de sólidos não apresentou grandes divergências entre os pontos observados e simulados na etapa de calibração para este período sazonal.

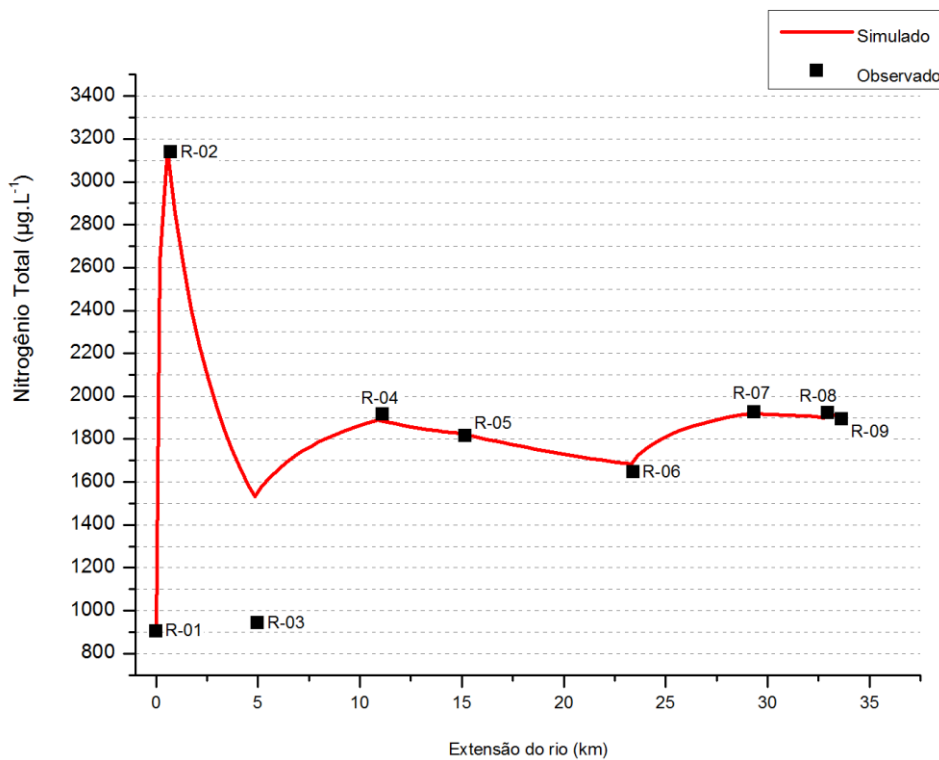


Figura 39 - Curva de calibração da concentração de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de primavera de 2011 no rio Sorocabaçu.

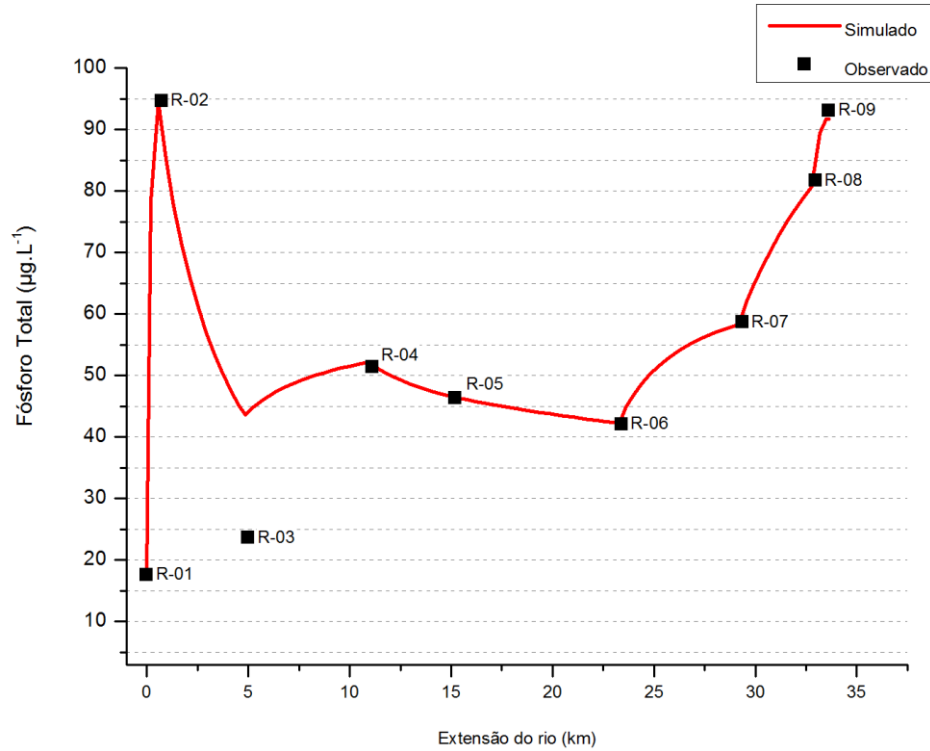


Figura 40 - Curva de calibração da concentração de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de primavera de 2011 no rio Sorocabaçu.

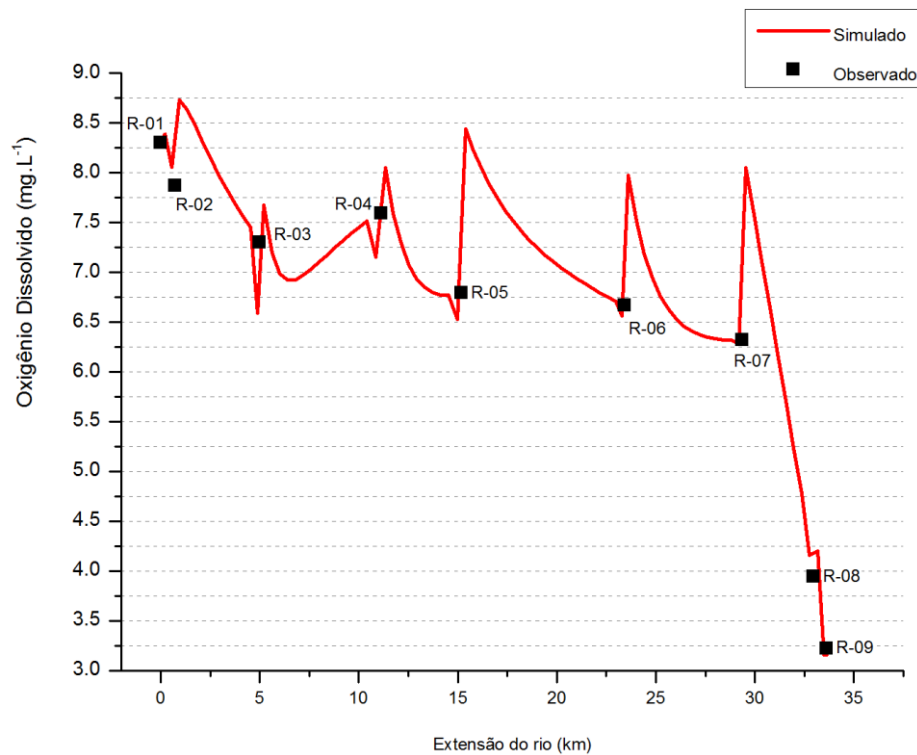


Figura 41 - Curva de calibração da concentração de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de primavera de 2011 no rio Sorocabaçu.

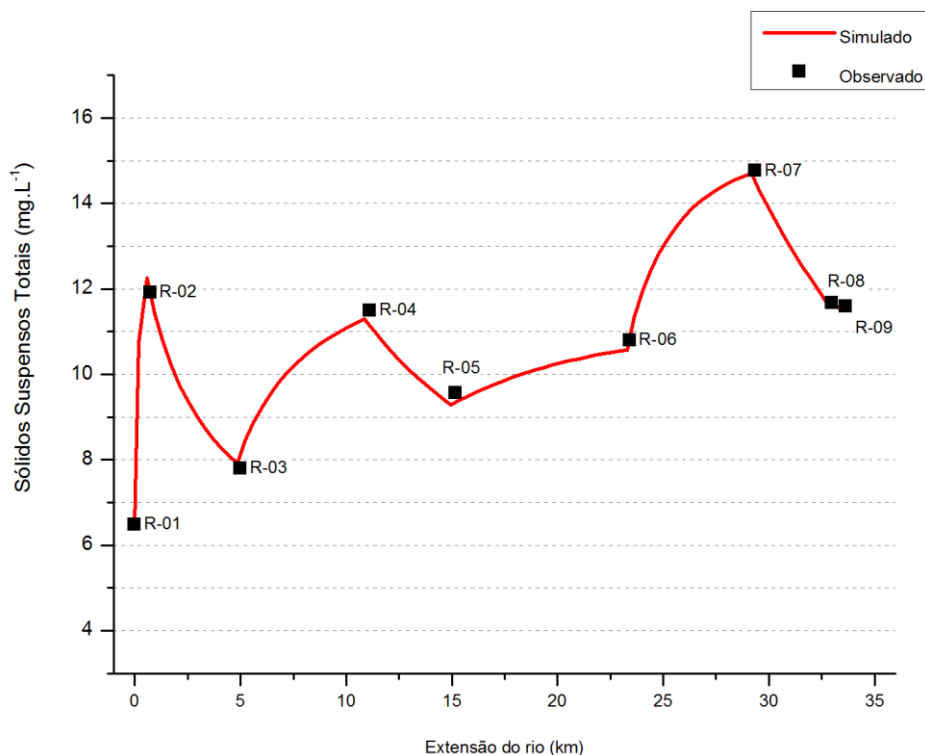


Figura 42 - Curva de calibração da concentração de sólidos suspensos totais (mg.L<sup>-1</sup>) referente aos dados obtidos das amostras de primavera de 2011 no rio Sorocabaçu.

#### 4.5.1.2 Calibração das variáveis referentes a coleta de verão (08 de fevereiro de 2012)

As Figuras 43, 44, 45 e 46 apresentam as simulações de nitrato, nitrogênio total, fósforo total, oxigênio dissolvido e sólidos suspensos totais com os dados coletados durante o verão de 2012. Não se observou diferenças expressivas entre os valores simulados e observados para nutrientes durante este período amostral, resultado que refletiu também na simulação de oxigênio dissolvido. Já a partir da curva de sólidos suspensos totais observou-se que os pontos R-06 e R-08 ficaram fora da curva, sendo R-06 o que apresentou maior distanciamento.

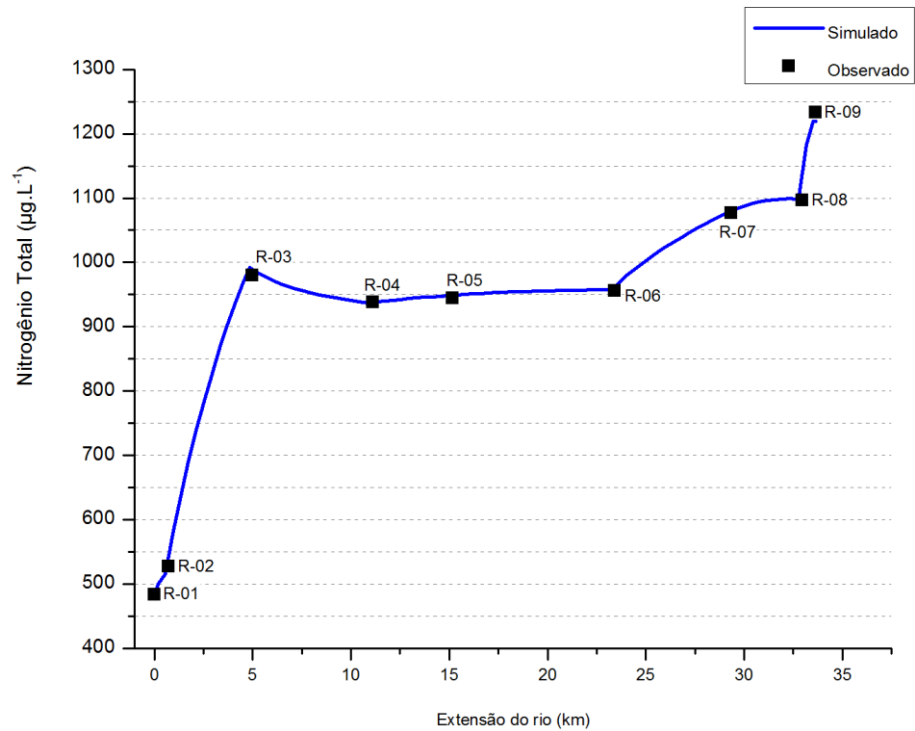


Figura 43 - Curva de calibração da concentração de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de verão de 2012 no rio Sorocabaçu.

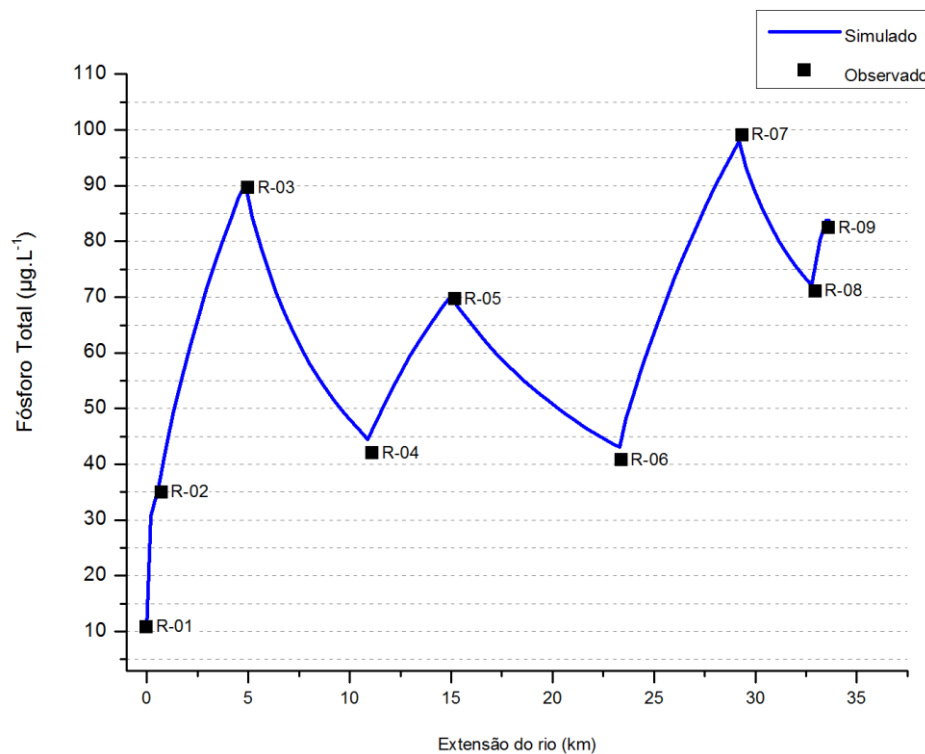


Figura 44 - Curva de calibração da concentração de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de verão de 2012 no rio Sorocabaçu.

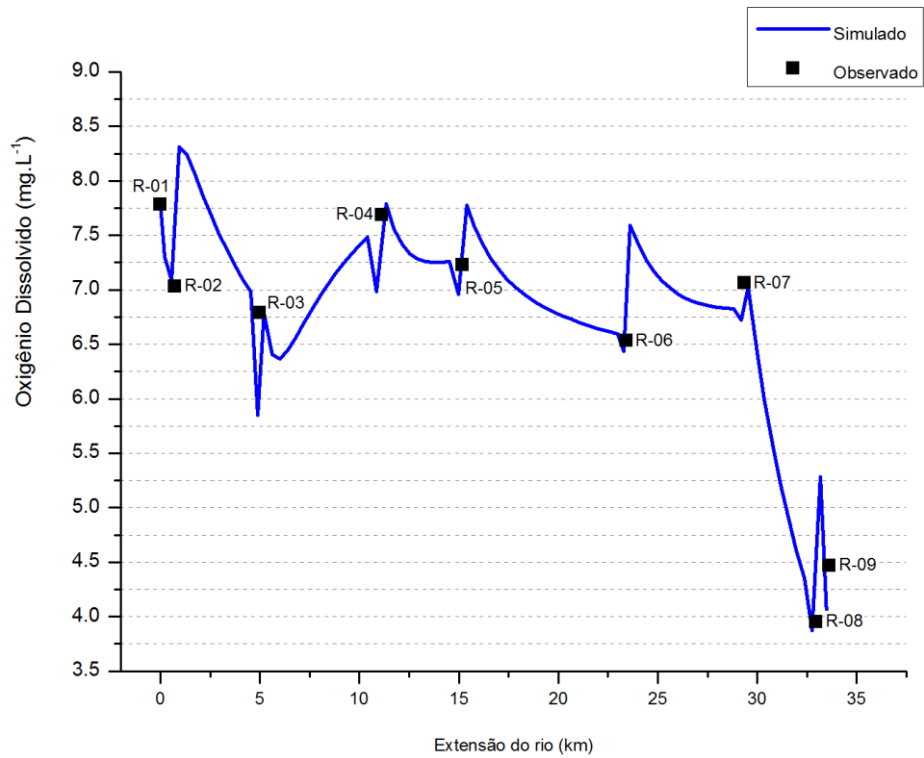


Figura 45 - Curva de calibração da concentração de oxigênio dissolvido (mg.L<sup>-1</sup>) referente aos dados obtidos das amostras de verão de 2012 no rio Sorocabaçu.

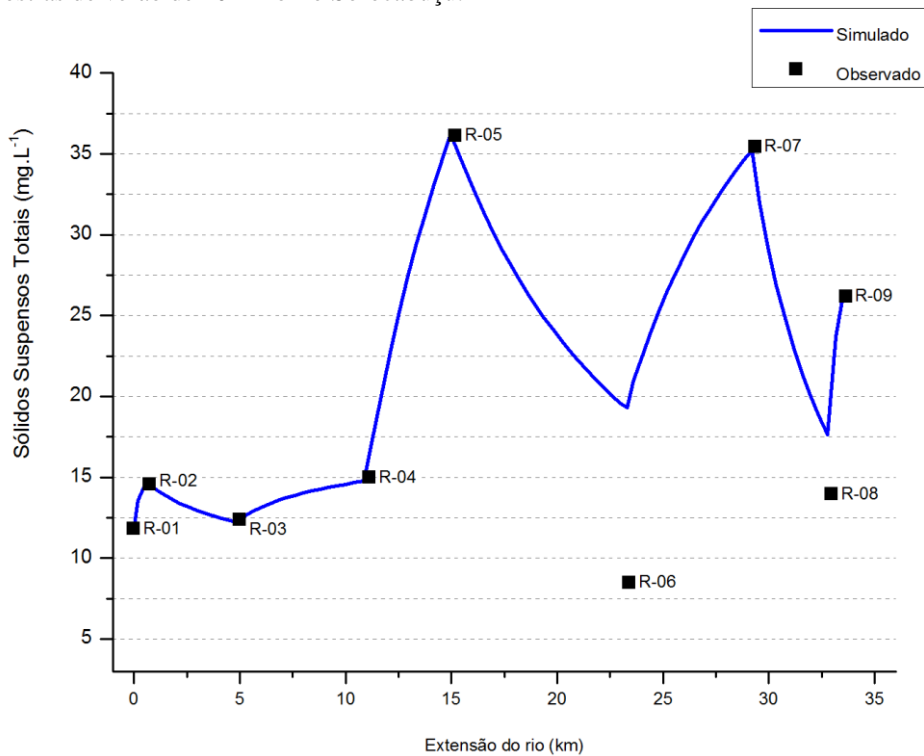


Figura 46 - Curva de calibração da concentração de sólidos suspensos totais (mg.L<sup>-1</sup>) referente aos dados obtidos das amostras de verão de 2012 no rio Sorocabaçu.

#### 4.5.1.3 Calibração das variáveis referentes a coleta de outono (18 de abril de 2012)

As Figuras 47, 48, 49 e 50 apresentam as simulações de nitrato, nitrogênio total, fósforo total, oxigênio dissolvido e sólidos suspensos totais com os dados coletados durante o outono de 2012. Durante este período amostral ocorreram as menores distâncias entre os pontos observados e às curvas de calibração dos parâmetros, com afastamentos em R-04, R-05 e R-06 na curva de nitrogênio total.

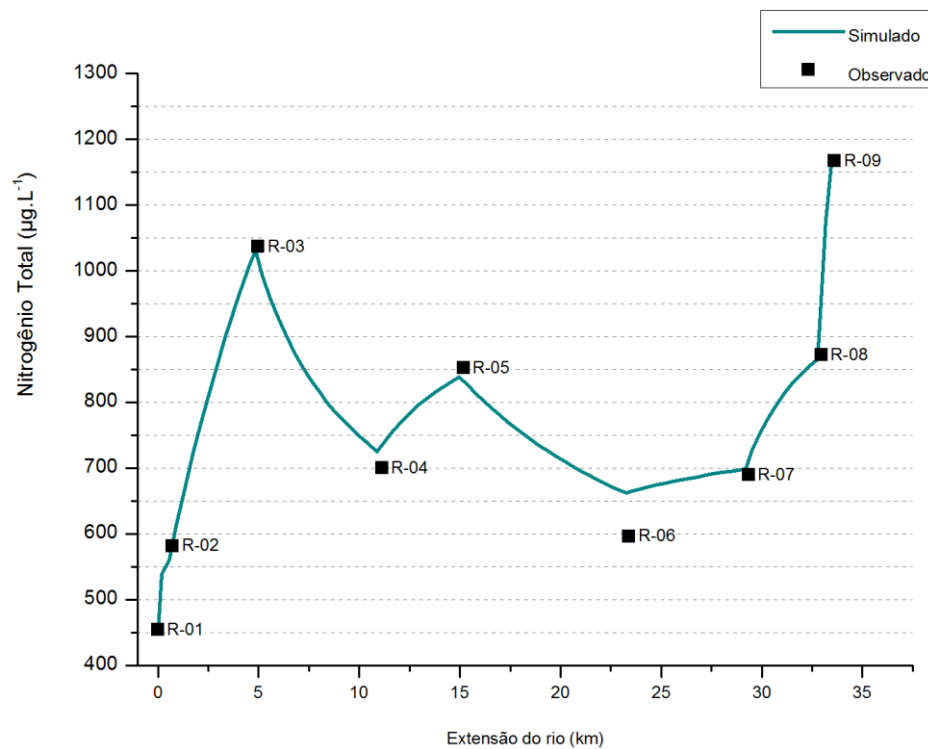


Figura 47 - Curva de calibração da concentração de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de outono de 2012 no rio Sorocabaçu.

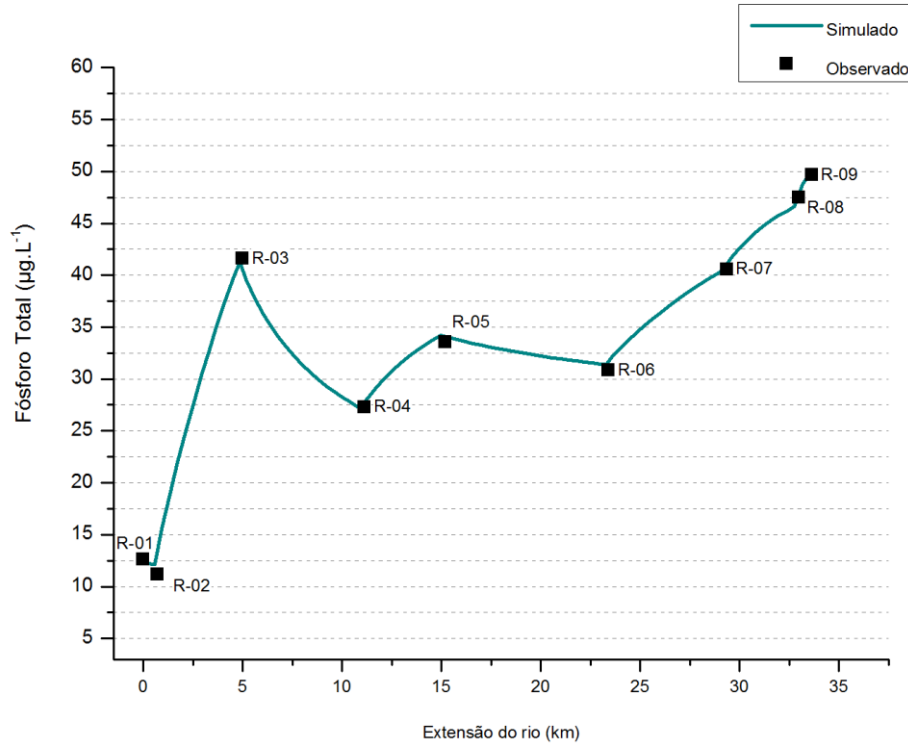


Figura 48 - Curva de calibração da concentração de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de outono de 2012 no rio Sorocabaçu.

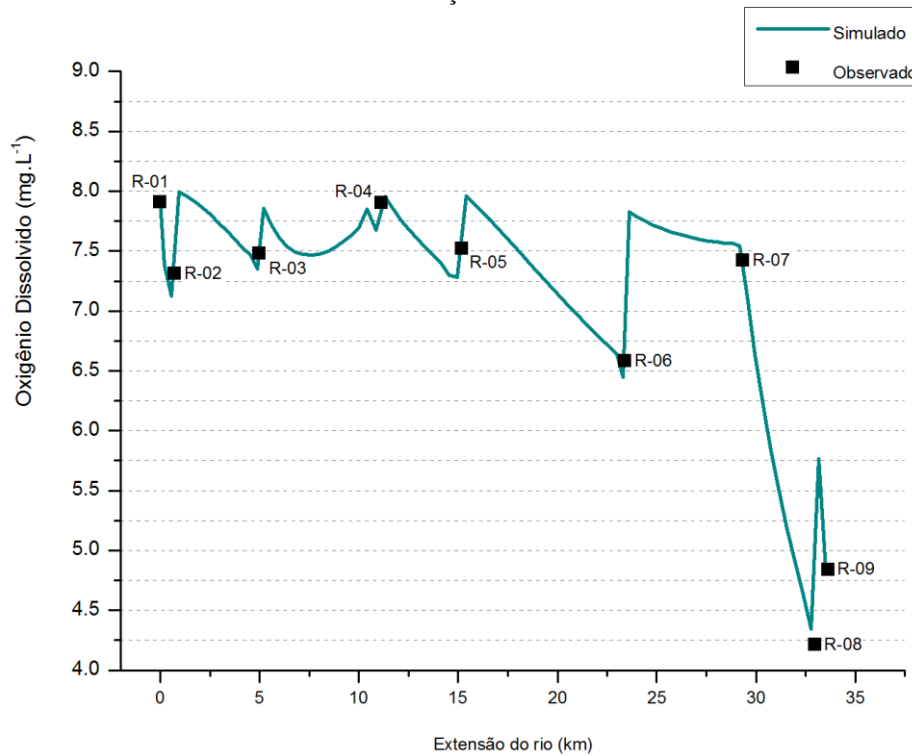


Figura 49 - Curva de calibração da concentração de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) referente aos dados obtidos das amostras de outono de 2012 no rio Sorocabaçu.

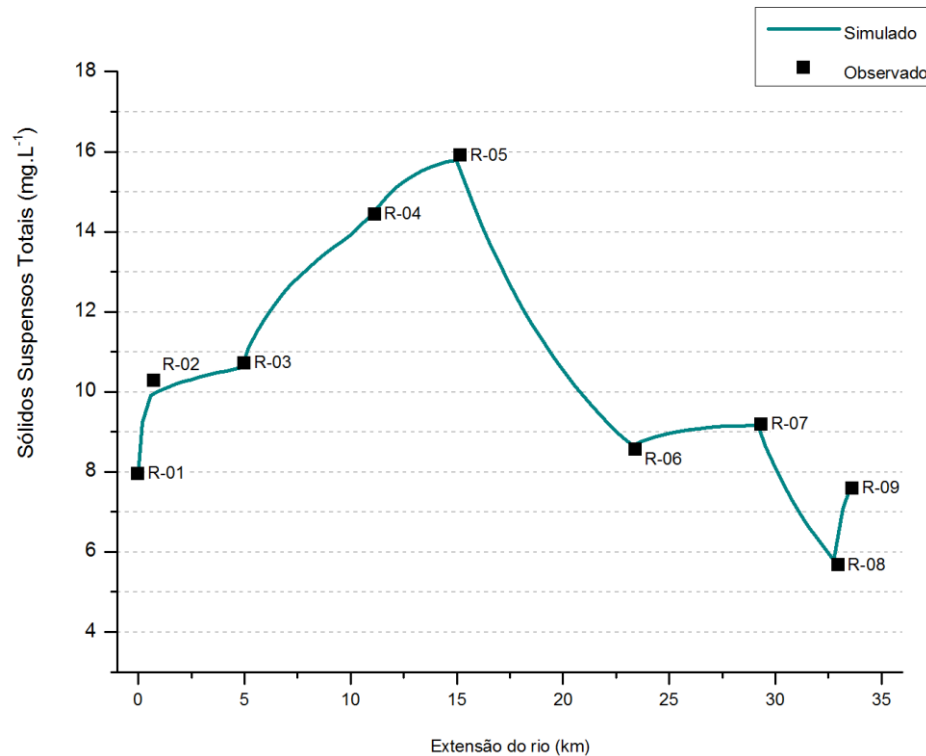


Figura 50 - Curva de calibração da concentração de sólidos suspensos totais (mg.L<sup>-1</sup>) referente aos dados obtidos das amostras de outono de 2012 no rio Sorocabaçu.

#### 4.5.1.4 Discussão geral da calibração dos cenários

De maneira geral, pode-se dizer que o modelo simulou satisfatoriamente os parâmetros inseridos para as diferentes situações do rio Sorocabaçu durante um ciclo sazonal completo. As maiores desconformidades entre os valores observados e simulados ocorreram nos maiores valores dos parâmetros (picos), que foram associados à influência antrópica na bacia e não corresponderam ao que era esperado em alguns trechos.

Ressalta-se que, para realização da calibração, foi necessário estimar as cargas de input dos parâmetros nos trechos entre cada ponto de coleta e inserí-los na planilha Diffuse Sources do modelo QUAL2Kw. Na ausência de dados pontuais de poluição, para este estudo, toda contribuição orgânica e inorgânica foi considerada proveniente da área de influência no entorno do rio sendo, portanto, considerada difusa, inclusive os tributários do rio Sorocabaçu. Sendo assim, a carga de poluição difusa estimada representou a contribuição da área de entorno do rio, e a partir da comparação com as características dos pontos e o uso e ocupação da região observados durante as campanhas de amostragem, pôde-se observar que o rio

Sorocabuçu pode ser dividido em 3 trechos principais: alto curso (R-01 à R-04); médio curso (R-04 à R-06); baixo curso (R-07 e R-08).

Conforme citado acima, quando associados às informações em campo, os dados de nitrogênio e sólidos visualizados na Tabela 3 indicam um possível despejo de esgoto doméstico bruto no rio Sorocabuçu, principalmente em seu alto curso, e uma maior contribuição de sólidos no médio e baixo curso. Os elevados valores de nitrogênio observados no baixo curso correspondem à transição do rio Sorocabuçu para o Sorocaba, sendo este (ponto R-09) já influenciado pela entrada do rio Sorocamirim, Una e pelo efluente da ETE de Ibiúna.

Tabela 3- Valores médios de contribuição difusa estimados pelo autor para calibração do modelo QUAL2Kw.

| Trechos     | Distância da nascente (km) |        | Vazão de influxo ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | Média da contribuição difusa estimada nos quatro períodos sazonais |   |   |
|-------------|----------------------------|--------|---|--|---|---|
|             | Acima                      | Abaixo |   | Sólidos Suspensos Inorgânicos ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )  | Nitrogênio Orgânico ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | Nitrato ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |
| Alto curso: |                            |        |   |  |   |   |
| R-01 a R-02 | 0.0                        | 0.7    | 0.12  | 8.3  | 710.0   | 940.0   |
| R-02 a R-03 | 0.7                        | 5.0    | 0.08  | 4.3  | 525.0   | 1285.0  |
| R-03 a R-04 | 5.0                        | 11.1   | 0.27  | 8.8  | 159.5   | 845.5   |
| Médio curso |                            |        |   |  |   |   |
| R-04 a R-05 | 11.1                       | 15.2   | 0.20  | 23.4   | 143.8   | 791.8   |
| R-05 a R-06 | 15.2                       | 23.4   | 0.46  | 3.6  | 85.0  | 830.0   |
| Baixo curso |                            |        |   |  |   |   |
| R-06 a R-07 | 23.4                       | 29.4   | 0.46  | 22.5   | 296.3   | 1247.5  |
| R-07 a R-08 | 29.4                       | 33.0   | 0.46  | 1.1  | 250.0   | 1662.5  |

Notou-se também a sensibilidade da variável oxigênio dissolvido em relação à metodologia de calibração utilizada pelo modelo QUAL2Kw em todos os períodos sazonais. Ressalta-se que, para a calibração deste parâmetro, o modelo utilizou cálculos internos com

diferentes valores hidráulicos para cada um dos 85 elementos computacionais que representam o rio Sorocabaçu e atribuiu diferentes valores de coeficientes de reaeração para cada um deles, de modo que os valores de calibração próximos às diferentes concentrações inseridas no modelo (pontos de coleta) apresentaram maiores instabilidades, sendo esta a variável de maior dificuldade de calibração.

#### **4.5.2 Apresentação dos cenários propostos para o rio Sorocabaçu e os seus respectivos índices de estado trófico**

Com o intuito de demonstrar os diferentes comportamentos do rio Sorocabaçu durante o intervalo de um ano, a apresentação dos cenários propostos foi subdividida em períodos sazonais. Os dados utilizados para elaboração dos cenários foram os de calibração do modelo (descritos anteriormente) e os resultados foram dispostos em forma de gráficos de sólidos suspensos totais, oxigênio dissolvido, fósforo e nitrogênio total.

Conforme a SSE-CSAN (2010) afirmou, o rio Sorocabaçu foi classificado acordo com a resolução CONAMA 430/2011 como Classe 2, sendo assim os valores estipulados por esta resolução serviram de guia para as discussões dos cenários. Da mesma maneira Cunha, Dodds e Calijuri (2011) estabeleceram valores de referência para fósforo total ( $0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ ) e nitrogênio total ( $0,31 \text{ mg.L}^{-1}$ ) que são mais restritivos do que os estabelecidos pela resolução CONAMA 430/2011. Estes valores de referência também foram analisados nesta discussão, tendo em vista que a pesquisa realizada pelos autores (op. cit.), que teve como fonte de informações os rios do Estado de São Paulo, foi pioneira neste tipo de avaliação em sistemas lóticos tropicais, além de fornecer informações complementares para uma possível revisão da resolução CONAMA 430/2011.

Em relação aos nutrientes, o índice de estado trófico (IET) foi calculado para o rio Sorocabaçu, conforme discutido em CETESB (2011) e por Lamparelli (2004), que utiliza os dados de fósforo total e clorofila-*a* para classificar os corpos hídricos do estado de São Paulo e, da mesma maneira, estes índices foram utilizados para os cenários propostos no rio Sorocabaçu. O IET calculado para cada cenário utilizou dados de fósforo total, uma vez que o modelo QUAL2Kw não apresenta clorofila-*a* como dado de saída após a calibração do sistema. Este fato não comprometeu a avaliação, visto que a própria CETESB (2011) informa que, na ausência de dados de fósforo total ou clorofila-*a* para o cálculo do IET o valor final

será calculado pela variável que se tem a informação. Lamparelli (2004) também descreveu em sua pesquisa que, por consequência da alta relação entre o volume de água, a velocidade de escoamento e a região marginal, os ambientes lóticos apresentam maiores valores de fósforo total (nutriente limitante do sistema) e menores de clorofila-*a* quando comparados aos ambientes lênticos. Sendo assim, os resultados do IET para os cenários propostos foram dispostos na discussão de cada período amostral.

#### **4.5.2.1 Cenários propostos para o inverno no rio Sorocabaçu**

Através da Figura 51 foi possível verificar que mesmo com os cenários de tratamento da poluição difusa, a concentração de nitrogênio total não atenderia o valor para manutenção do meio ambiente sugerido por Cunha, Dodds e Calijuri (2011), com os piores quadros nos trechos próximos aos pontos de coleta R-03, R-07, R-08 e R-09. A situação atual apresenta uma concentração superior ao valor de referência numa faixa que vai de 139% (próximo a R-05) até 362% em R-03 e 476% em R-09. A resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) não estabelece limites para NT.

Com exceção dos cenários de agravamento na coleta e tratamento (cenários 03, 04 e 05) e do último trecho referente ao cenário 02 (Figura 52), os cenários para a concentração de fósforo total se adequaram ao padrão estabelecido pela resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011). Porém, em comparação aos valores mais restritivos sugeridos por Cunha, Dodds e Calijuri (2011), as concentrações estariam adequadas somente nos cenários de tratamento de poluição difusa (6, 7 e 8) no rio Sorocabaçu e extrapolaram o valor nos últimos quilômetros, quando o mesmo se junta ao rio Una e Sorocamirim para formar o rio Sorocaba.

Em relação ao oxigênio dissolvido durante este período sazonal (Figura 53), todas as concentrações foram superiores às exigidas pela resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011), inclusive durante os cenários 03, 04 e 05, que representam os piores quadros de qualidade da água.

A quantidade de sólidos suspensos totais não superou  $17,0 \text{ mg.L}^{-1}$  em nenhum cenário proposto para o rio Sorocabaçu (Figura 54), sendo que os aumentos deste parâmetro nos trechos finais dos cenários representam a entrada dos rios Una e Sorocamirim, o que já era esperado.

Pontualmente, em relação ao IET (Figura 55), a nascente do rio Sorocabaçu pode ser classificada como ultraoligotrófica. Durante o cenário 0, a classificação predominou como oligotrófica, sendo que para os cenários propostos relativos a 2022 e 2032, além dos que envolvem a diminuição na coleta e tratamento de esgoto, conduziram a mudança do índice para estado mesotrófico. Já nos cenários de tratamento da poluição difusa, os cenários demonstraram uma tendência para a classificação ultraoligotrófica, mesmo o corpo de água ainda sendo predominantemente oligotrófico.

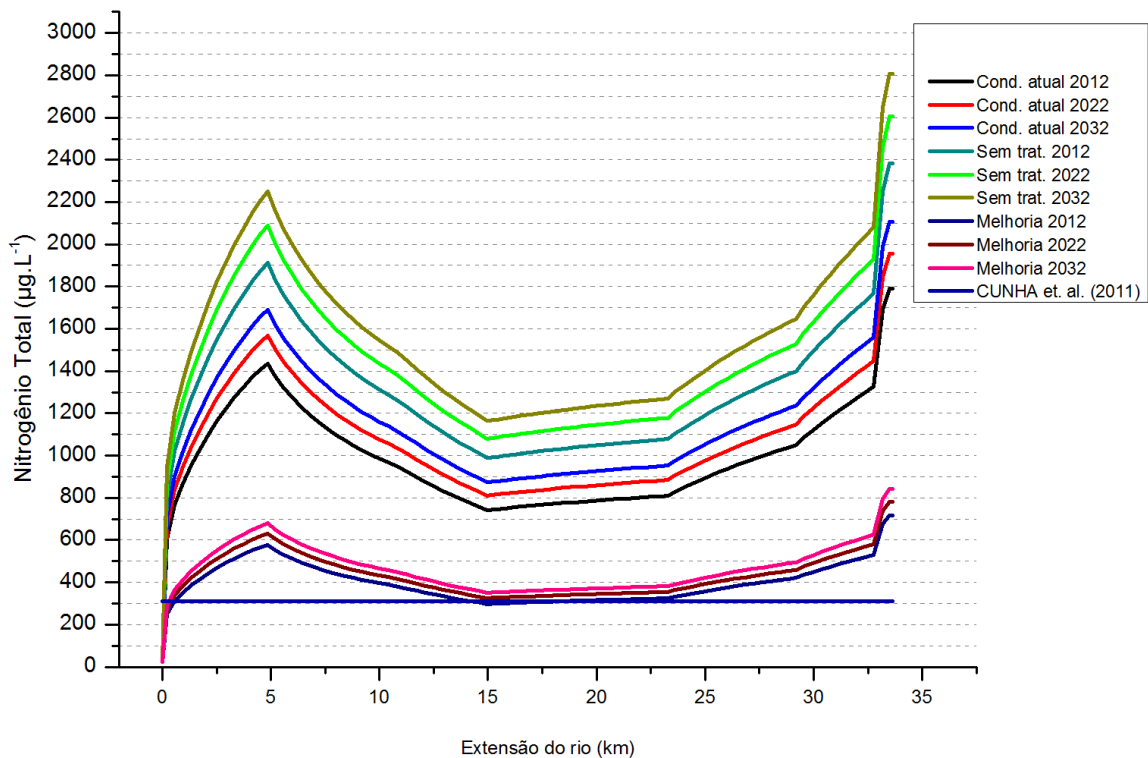


Figura 51 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o inverno no rio Sorocabaçu.

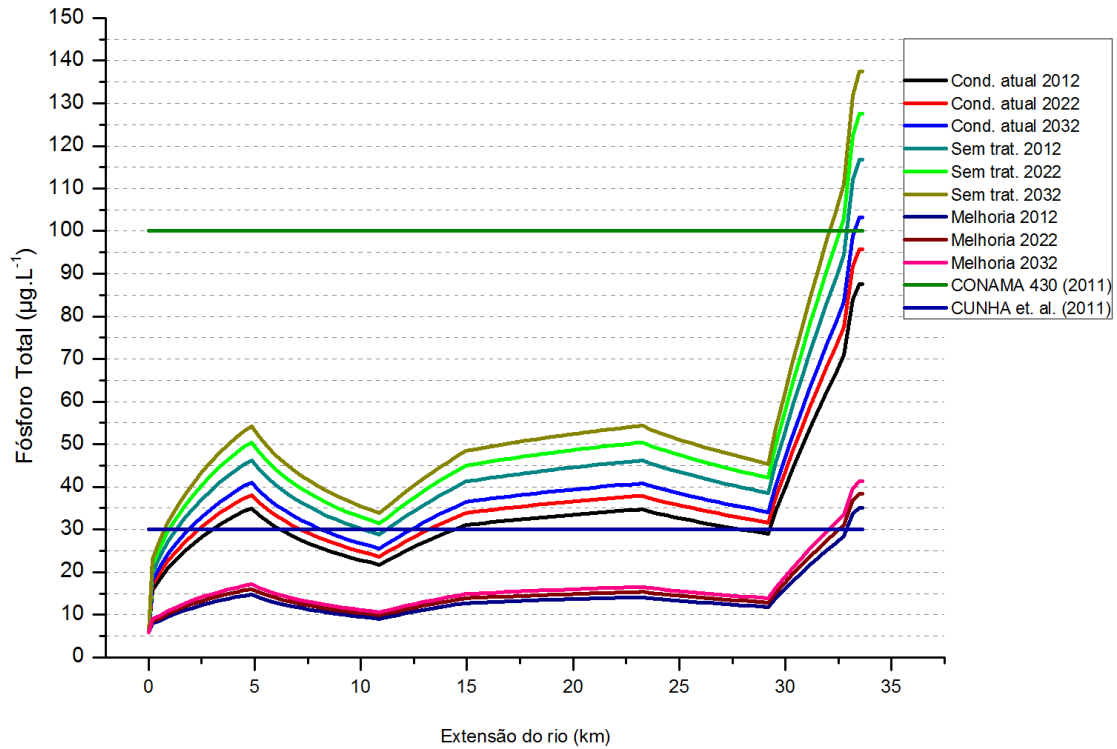


Figura 52 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o inverno no rio Sorocabaçu.

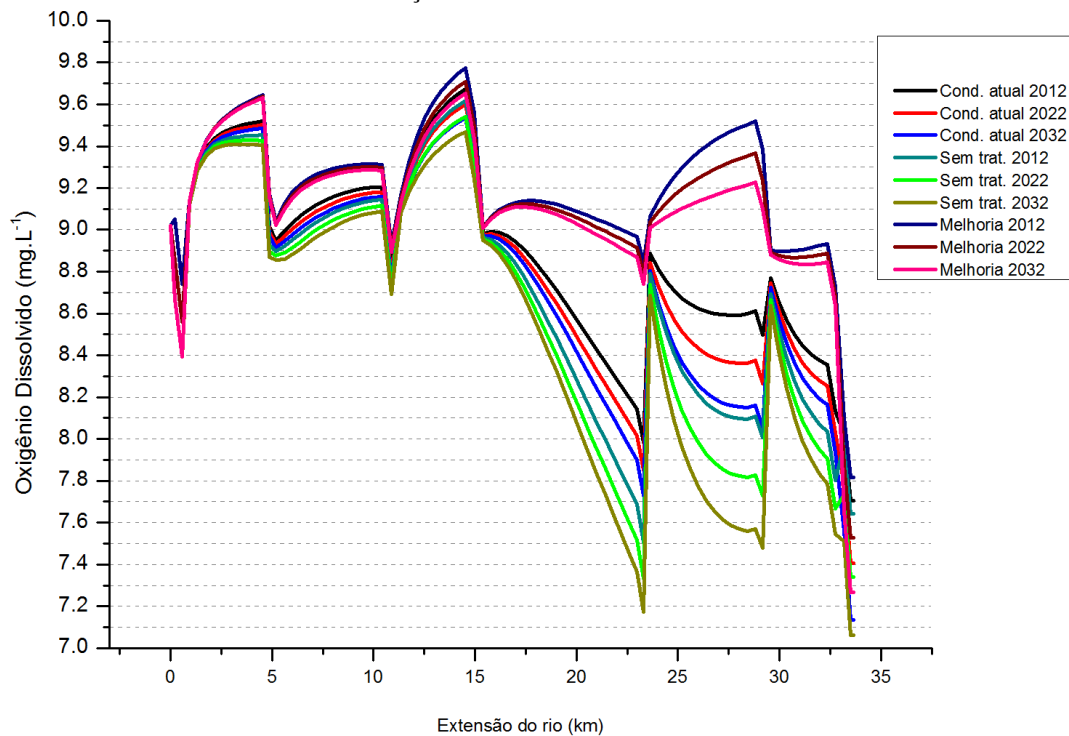


Figura 53 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o inverno no rio Sorocabaçu.

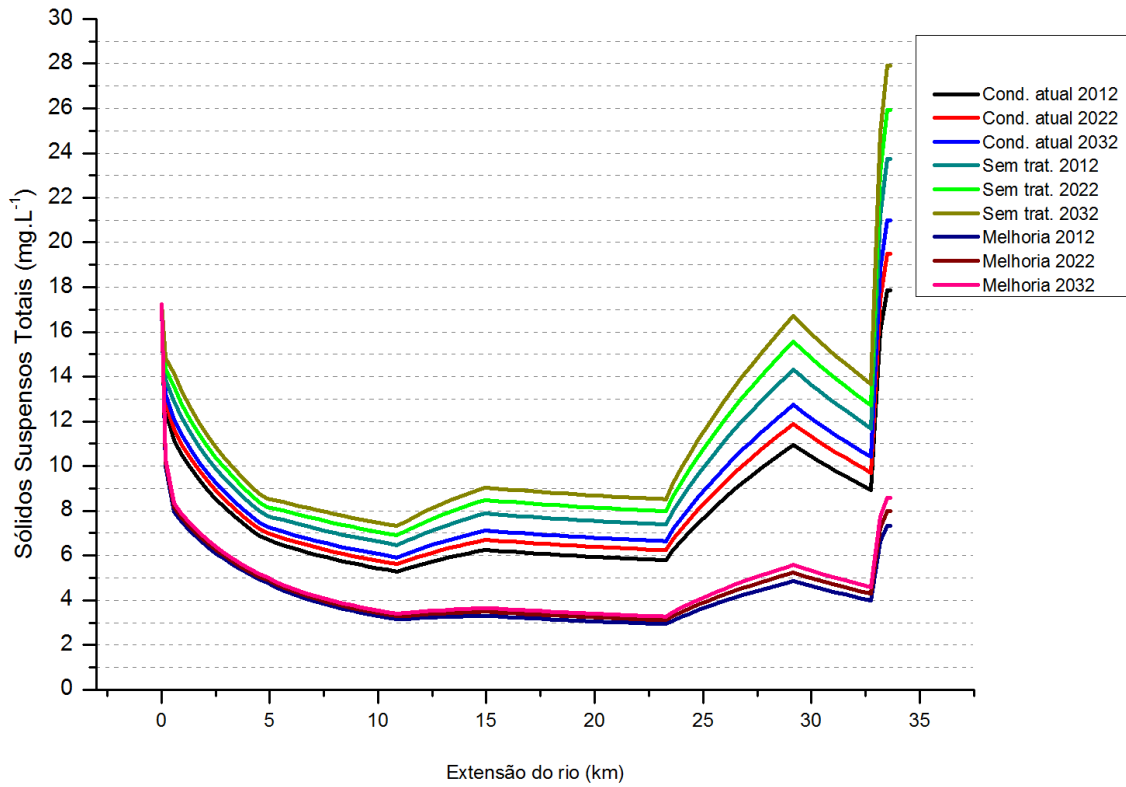


Figura 54 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o inverno no rio Sorocabaçu.

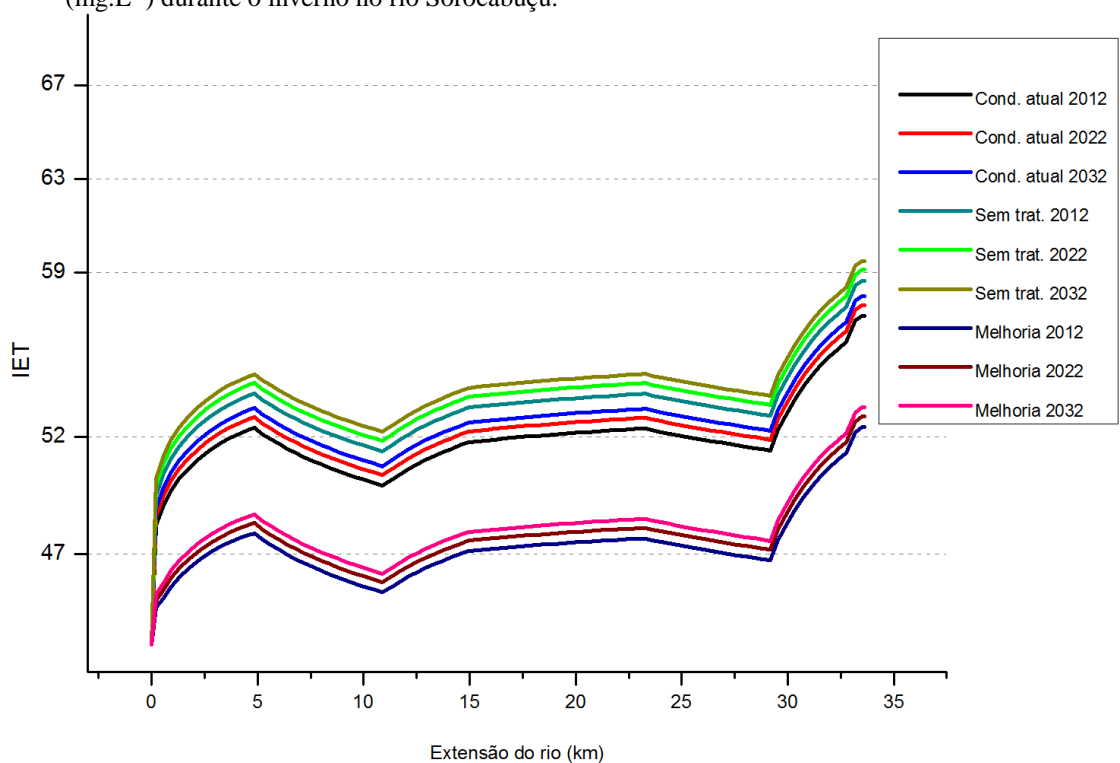


Figura 55 - Resultados das simulações dos cenários propostos para os índices de estado trófico durante o inverno no rio Sorocabaçu.

#### 4.5.2.2 Cenários propostos para a primavera no rio Sorocabaçu

Além da resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) não apresentar valores de padronização para NT (Figura 56), esta variável não se adequou ao valor limite sugerido por Cunha, Dodds e Calijuri (2011) em nenhum dos cenários propostos, sendo que a situação mais próxima verificada apresentou um valor 116% maior do que o limite (cenário 06). As maiores variações observadas foram entre os pontos R-01 e R-03, no trecho que vai de da nascente ao quilômetro 5. Após este trecho, a variação ocorreu de forma mais atenuada, mesmo assim alcançou uma diferença máxima de 846% em relação ao valor limite próximo ao quilômetro 11 (cenário 05).

Os cenários com as concentrações de fósforo total (Figura 57) se encontraram dentro do valor limitante para rios de Classe 2 determinado pela resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) para o cenário 0 e de melhora da coleta e tratamento de poluição difusa (cenários 06, 07 e 08), sendo que estes últimos se adequaram também à faixa de Cunha, Dodds e Calijuri (2011) nos trechos que vai do quilômetro 2 ao 31. Nos trechos próximos a nascente e a foz do rio, a qualidade deste parâmetro sofreu grandes variações chegando a superar em 45% a resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) para o cenário 05 nestes locais.

As concentrações de oxigênio dissolvido para os todos os cenários se mostraram de acordo com o estabelecido para rios de Classe 2 (Figura 58) até o quilômetro 30, apresentando valores até 78% maiores do que a norma. Porém, após este quilômetro, a concentração de OD decresceu e atingiu concentrações 44% inferiores ao padrão.

Quanto aos sólidos suspensos totais (Figura 59) para o cenário 0 e para os cenários 01, 02, 03, 04, e 05, as concentrações variaram entre 8 mg.L<sup>-1</sup> e 23 mg.L<sup>-1</sup>. Para os cenários de melhora na coleta e tratamento da poluição difusa, a faixa de concentração de sólidos esteve entre 3,5 mg.L<sup>-1</sup> e 7,0 mg.L<sup>-1</sup>. A maior variação ocorreu no trecho inicial do rio e, da nascente à foz, a concentração desta variável aumentou.

A classificação do IET para este período (Figura 60) foi bem determinada e variou entre oligotrófico nos cenários 06, 07 e 08 e mesotrófico para os demais cenários. No trecho inicial e final do rio ocorreram picos nas concentrações de PT (variável determinante para este parâmetro), o que justifica este reflexo também na classificação do item e gerou variação da classificação momentaneamente em alguns cenários (04 e 05).

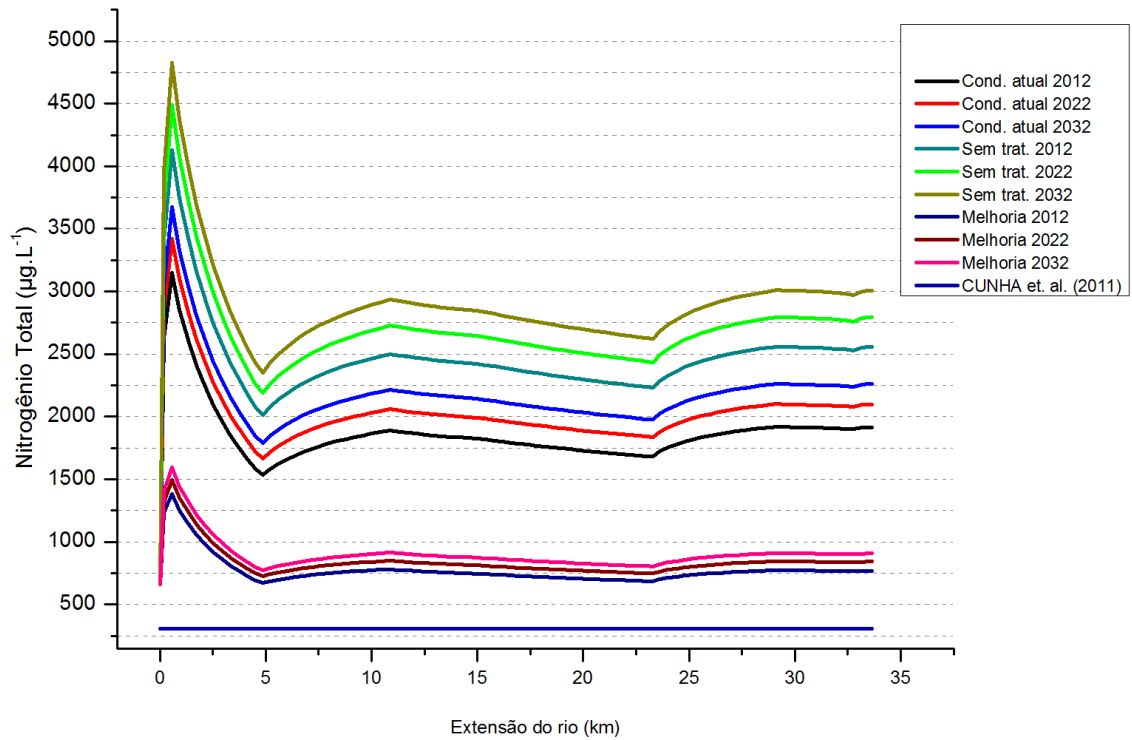


Figura 56 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante a primavera no rio Sorocabaçu.

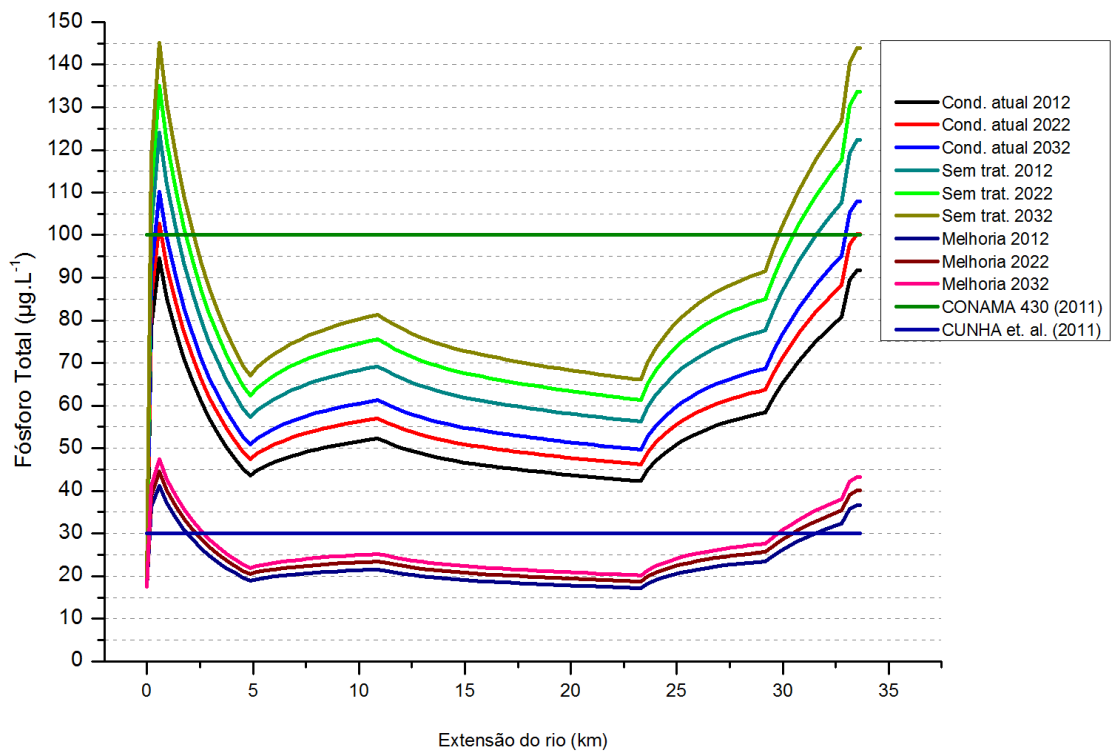


Figura 57 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante a primavera no rio Sorocabaçu.

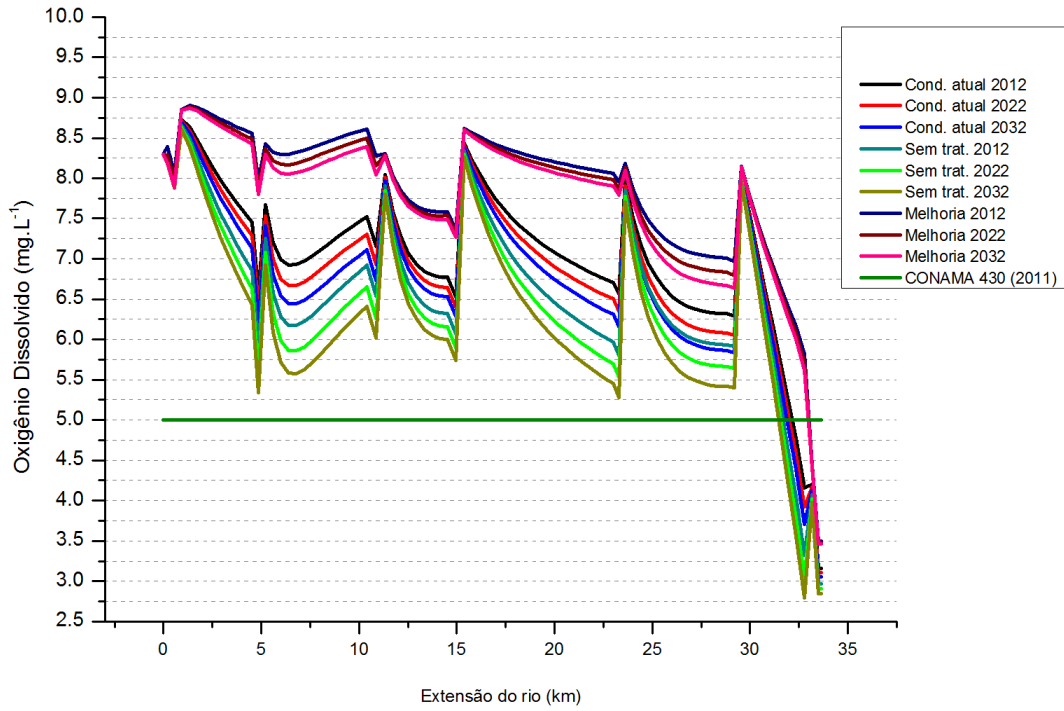


Figura 58 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante a primavera no rio Sorocabaçu.

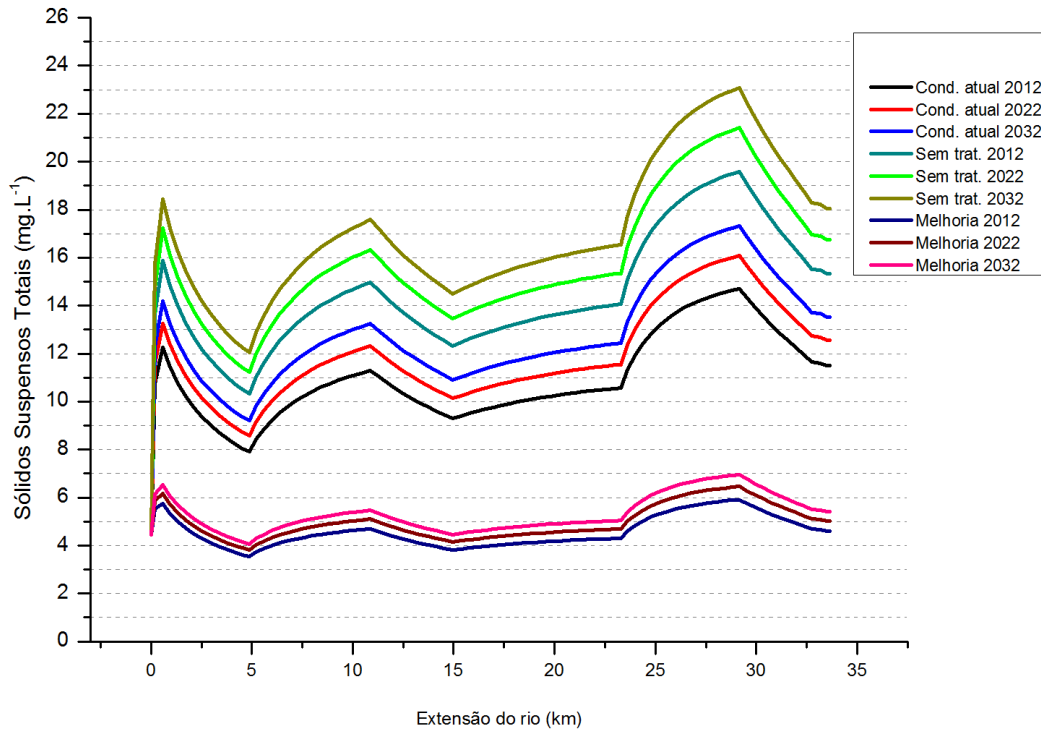


Figura 59 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante a primavera no rio Sorocabaçu.

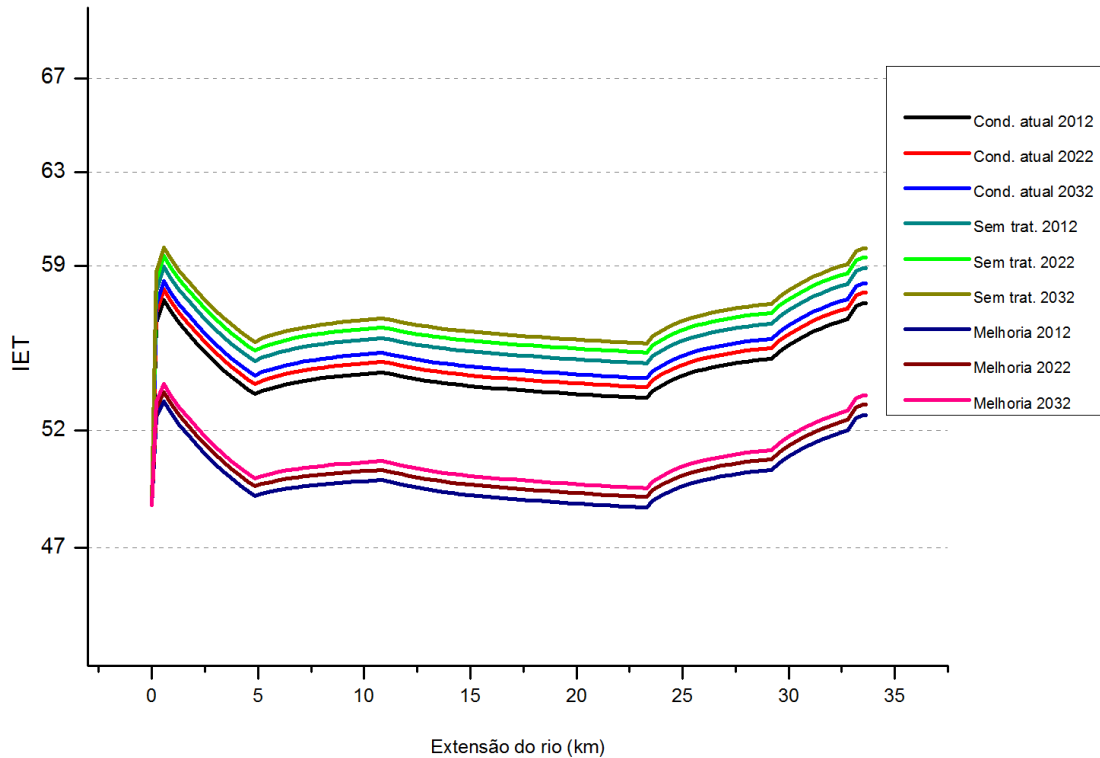


Figura 60 - Resultados das simulações dos cenários propostos para os índices de estado trófico durante a primavera no rio Sorocabaçu.

#### 4.5.2.3 Cenários propostos para o verão no rio Sorocabaçu.

Observando os cenários de nitrogênio total durante o verão (Figura 61), verificou-se a não conformidade com o padrão sugerido por Cunha, Dodds e Calijuri (2011) em nenhuma das situações propostas. O ponto de nascente apresentou concentração 41% maior do que o padrão sugerido e ocorreu um aumento agudo da concentração deste parâmetro nos primeiros 4,5 quilômetros, que posteriormente se manteve de forma atenuada até a foz do rio. O cenário 0 apresentou valores 290% superiores ao padrão já no rio Sorocaba e os cenários de tratamento 6, 7 e 8 apresentaram uma superioridade máxima na concentração deste nutriente de 85% ao valor padrão ( $310 \mu\text{g.L}^{-1}$ ).

As concentrações de fósforo total oscilaram bastante com alteração de comportamento como foi observado na Figura 62, com o cenário 0 de acordo com a resolução CONAMA 430/2011 em todo seu percurso, mas superior em até 220% do valor estabelecido por Cunha, Dodds e Calijuri (2011) no quilômetro 29 (próximo ao R-07). Notou-se também que o crescimento populacional (cenários 01 e 02) foi suficiente para elevar as concentrações de PT acima do valor limite determinado pela resolução CONAMA 430/2011, como pode ser observado nos quilômetros 5 e 29. Apesar da coleta e tratamento atual do município ser

responsável por manter o rio de acordo com a resolução CONAMA 430/2011, o que foi observado ao comparar com as situações sem tratamento algum (cenários 03, 04 e 05), o tratamento da poluição difusa representado pelos cenários 06, 07 e 08 demonstraram uma maior proximidade e inclusive adequação em muitos trechos ao valor limite estabelecido por Cunha, Dodds e Calijuri (211).

O oxigênio dissolvido se adequou a resolução CONAMA 430/2011 até o quilômetro 29 para todos os cenários, com exceção dos cenários 03, 04 e 05 no quilômetro 4 (Figura 63), a partir de então a influência da planície de alagamento e a confluência com os rios Sorocamirim e Una verificaram uma redução na concentração de oxigênio dissolvido com valores 40% inferiores à norma.

As concentrações de sólidos suspensos totais foram apresentadas na Figura 64 e verificou-se que durante os 10 quilômetros iniciais do rio, a concentração máxima observada foi de aproximadamente  $23 \text{ mg.L}^{-1}$ , por outro lado nos quilômetros seguintes do rio a concentração máxima atingiu  $56 \text{ mg.L}^{-1}$ , com picos em R-05 e R-07.

A classificação dos cenários durante o verão conforme o IET foi apresentada na Figura 65. A nascente do rio foi classificada como ultraoligotrófica e durante os cenários de melhoria na coleta e tratamento da poluição difusa (cenários 06, 07 e 08) o corpo de água pode ser classificado como oligotrófico, com curtas variações para a classe mesotrófica nos trechos próximos ao ponto de coleta R-03 e R-07. Para os outros cenários (01, 02, 03, 04, e 05) e inclusive para a situação atual do rio Sorocabuçu, a classificação do mesmo é mesotrófica, podendo variar para níveis eutróficos nos mesmos trechos citados anteriormente no caso de ocorrer um cancelamento na coleta e tratamento de esgotos do município para os anos de 2022 e 2032.

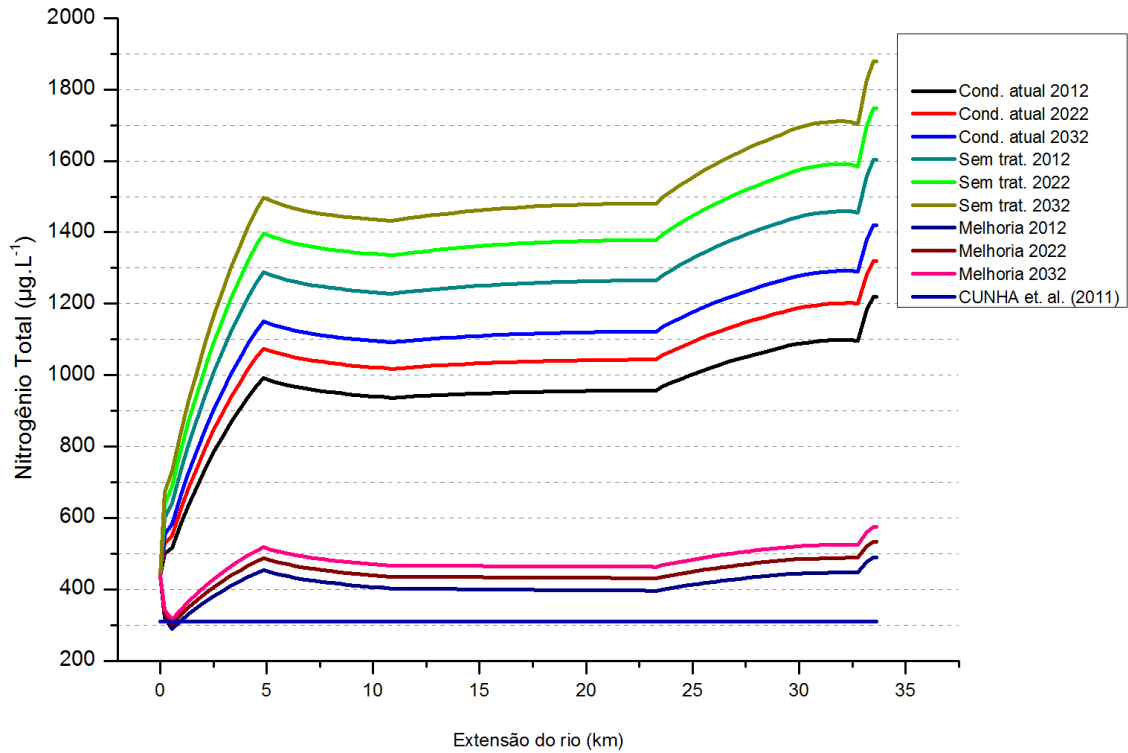


Figura 61 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o verão no rio Sorocabaçu.

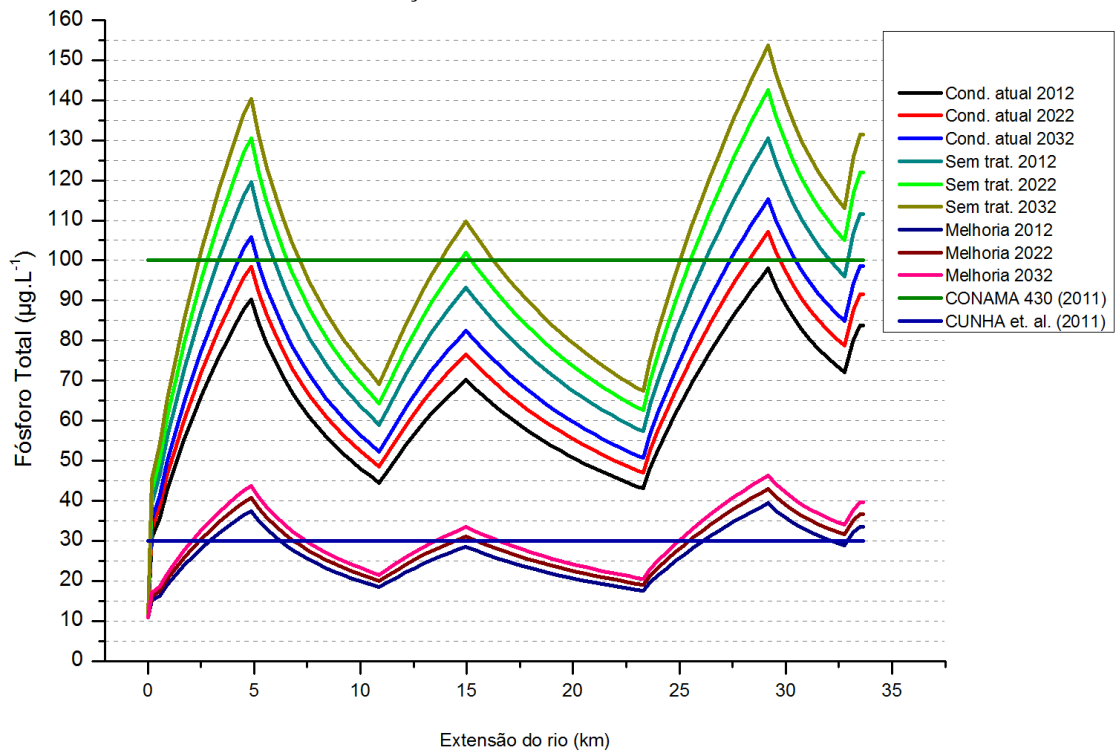


Figura 62 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o verão no rio Sorocabaçu.

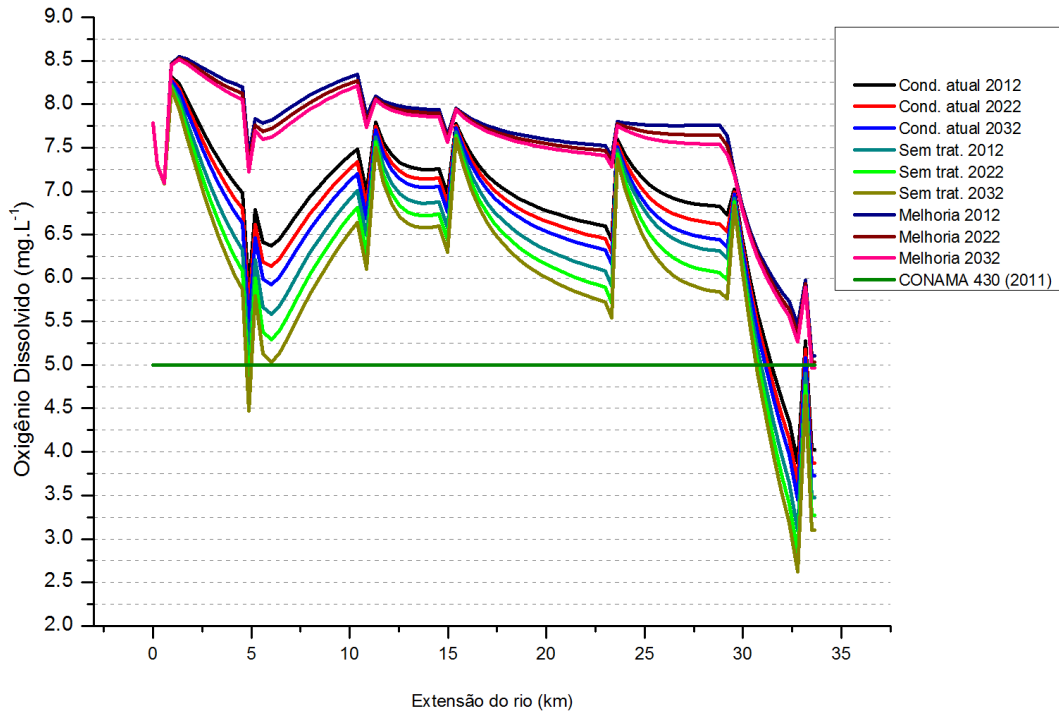


Figura 63 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o verão no rio Sorocabaçu.

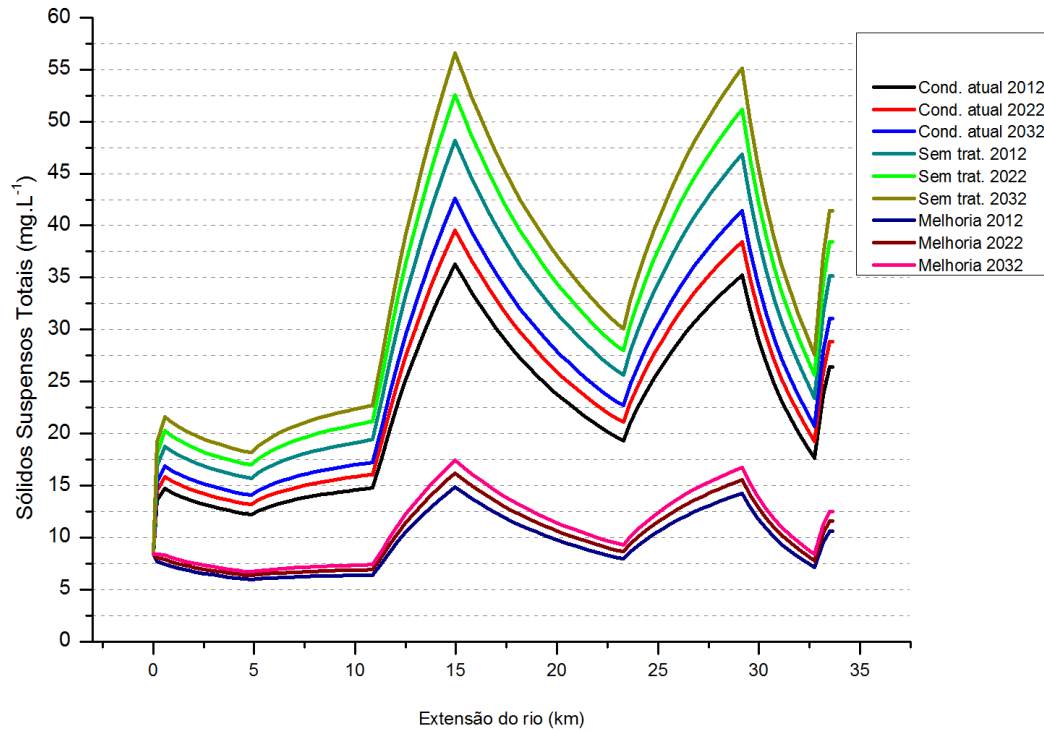


Figura 64 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o verão no rio Sorocabaçu.

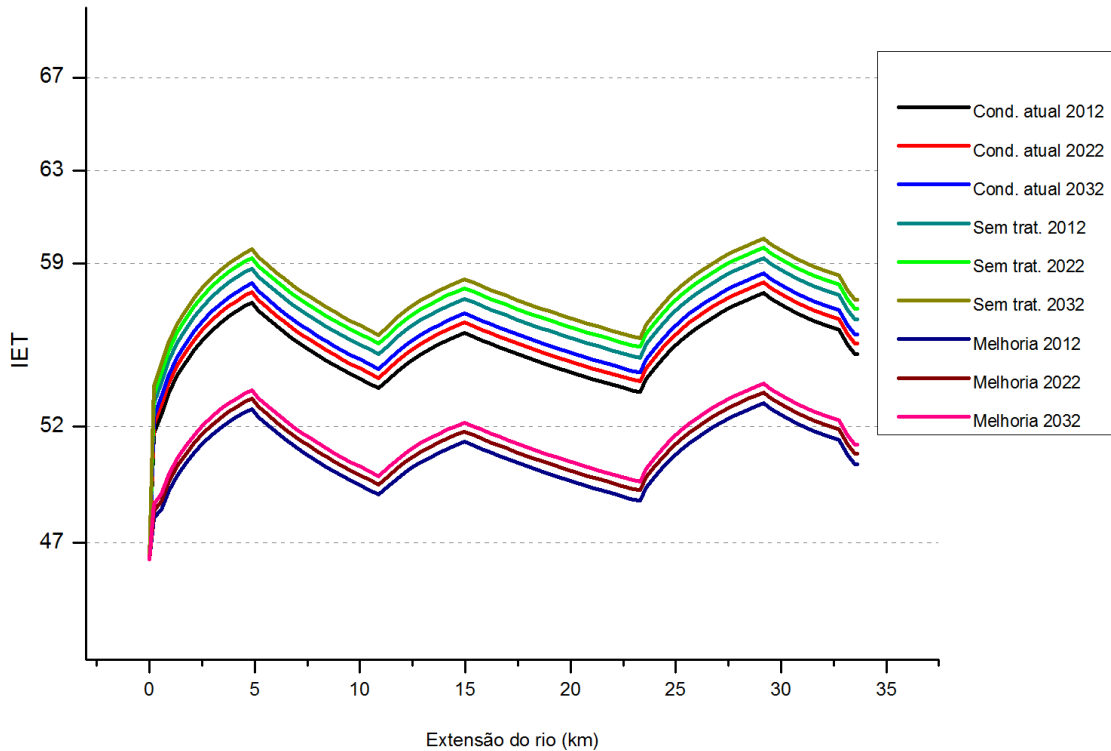


Figura 65 - Resultados das simulações dos cenários propostos para os índices de estado trófico durante o verão no rio Sorocabaçu.

#### 4.5.2.4 Cenários propostos para o outono no rio Sorocabaçu.

As concentrações de nitrogênio total para os cenários propostos (Figura 66) não se adequaram à referência apresentada por Cunha, Dodds e Calijuri (2011), sendo que para o cenário 0 de coleta e tratamento esta concentração foi superior em 38% na nascente e em 232% no quilômetro 4,8 (R-03) para o rio Sorocabaçu, e com 278% acima já no rio Sorocaba. Para os cenários 01, 02, 03, 04 e 05 estas concentrações foram maiores, sendo o valor máximo 492% acima em R-09 para o cenário 05. Os cenários que envolvem melhora no tratamento da poluição difusa conseguiram se adequar ao valor de referência somente em um trecho de aproximadamente 10 quilômetros de comprimento do rio, que vai de R-05 a R-07, revelando que o tratamento difuso necessário para adequar-se à norma em projeções futuras deve ser superior ao apresentado. Vale ressaltar que a nascente do rio Sorocabaçu apresentou os menores valores de inadequação ao valor proposto (38%), sugerindo que as interferências da região de entorno do rio foram as principais responsáveis pelos elevados valores citados anteriormente.

Assim como no inverno, as concentrações de fósforo total para o cenário 0 estavam de acordo com a resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) e próximas ao valor de referência sugerido por Cunha, Dodds e Calijuri (2011), com a nascente e os primeiros 2 quilômetros respeitando ambos os valores (Figura 67). A partir deste trecho, as concentrações de fósforo total para o cenário 0 e também para cenários 01, 02, 03, 04 e 05 não se adequaram a norma, com valores superiores em até 366% para o rio Sorocabuçu e 336% no rio Sorocaba. Quanto aos cenários 06, 07 e 08, o limite ( $30 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) foi respeitado, apresentando concentrações máximas 45% inferiores no rio Sorocabuçu e 31% no rio Sorocaba.

As concentrações de oxigênio dissolvido respeitaram o valor estabelecido pela resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) em todos os cenários até o quilômetro 30 (Figura 68), onde inicia a área de alagamento do rio Sorocabuçu e em sequência ocorre a confluência com os rios Una e Sorocamirim e os níveis de OD decresceram, atingindo valores de concentração até 30% inferiores à legislação.

Através da Figura 69 notou-se que ocorreu um aumento na concentração de sólidos suspensos totais no trecho entre 5 e 15 quilômetros do rio Sorocabuçu alcançando um valor máximo de  $24,5 \text{ mg.L}^{-1}$  e posteriormente um comportamento de redução nesta concentração até o quilômetro 33, onde ele se encontra com o rio Sorocamirim e Una que remete à um aumento na concentração de sólidos suspensos totais novamente até o ponto de coleta R-09.

A Figura 70 apresenta o índice de estado trófico para os cenários deste período sazonal, que variaram entre ultraoligotrófico (trecho inicial dos cenários 06, 07 e 08) e mesotrófico (últimos 7 quilômetros dos cenários sem a melhoria no tratamento). A nascente foi classificada como oligotrófica, estando no valor inicial da faixa desta classe (47). Os cenários 01, 02, 03, 04 e 05 estiveram em estado oligotrófico até o quilômetro 5 do rio Sorocabuçu, passando para classe mesotrófica a partir de então. O cenário 0 sofreu a mesma variação, porém seu índice oscilou bastante entre as classificações de oligotrofia e mesotrofia, despontando para mesotrofia ao final de seu curso.

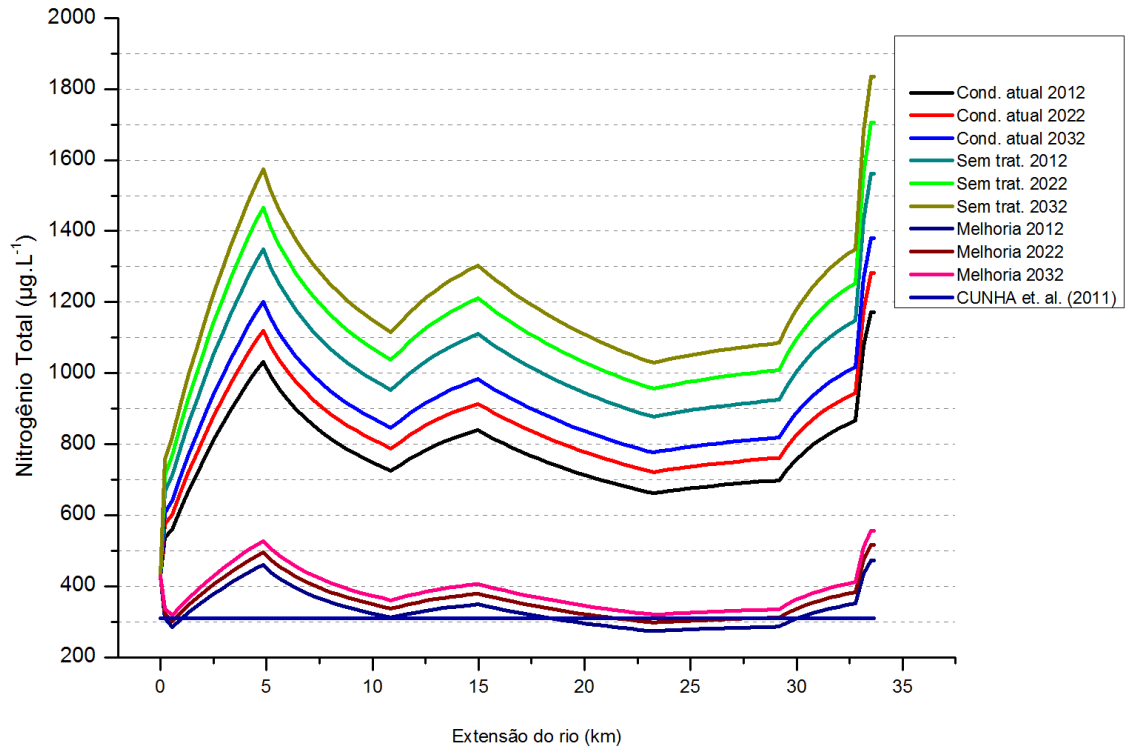


Figura 66 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de nitrogênio total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o outono no rio Sorocabaçu.

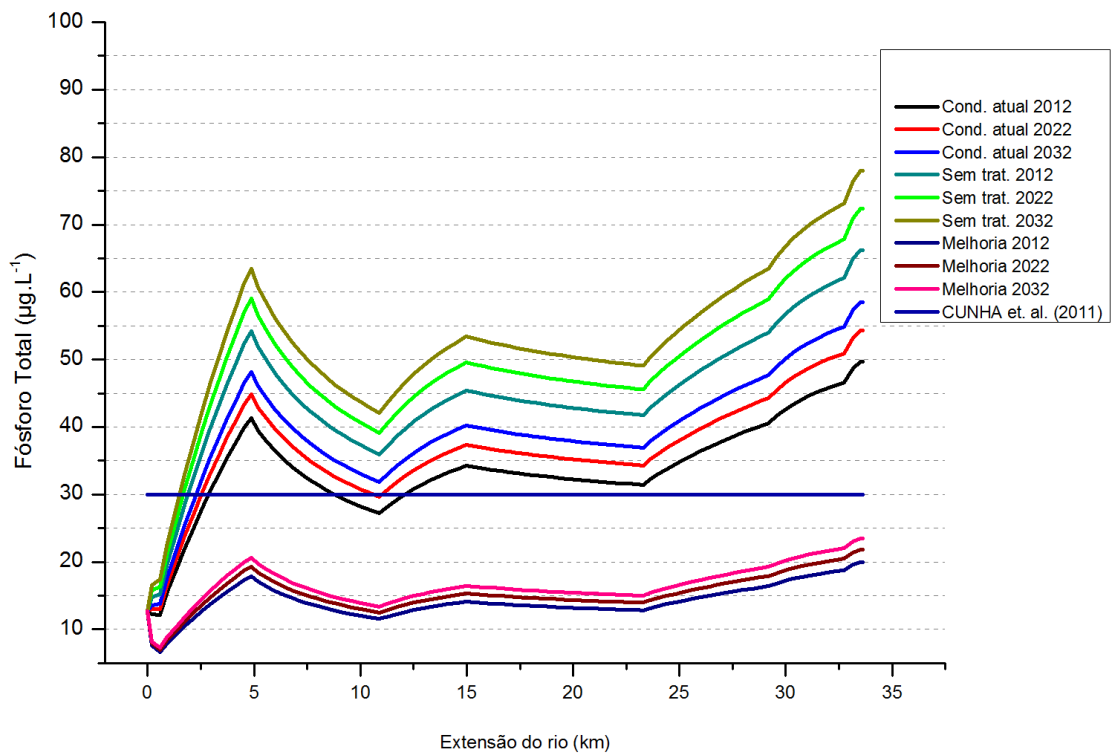


Figura 67 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de fósforo total ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) durante o outono no rio Sorocabaçu.

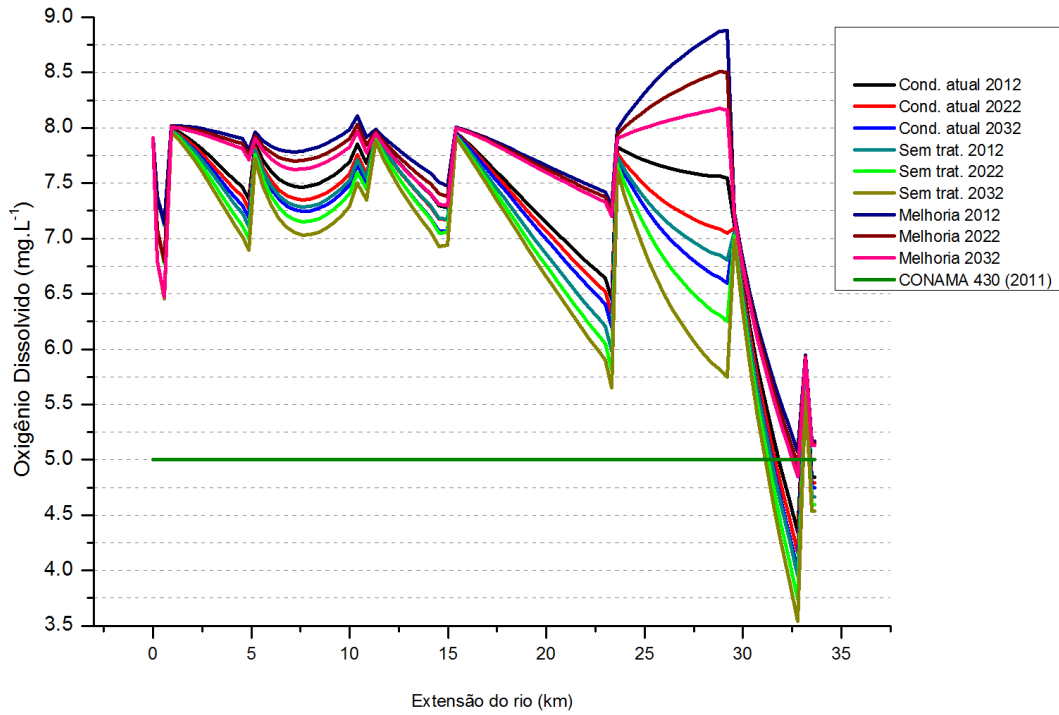


Figura 68 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o outono no rio Sorocabaçu.

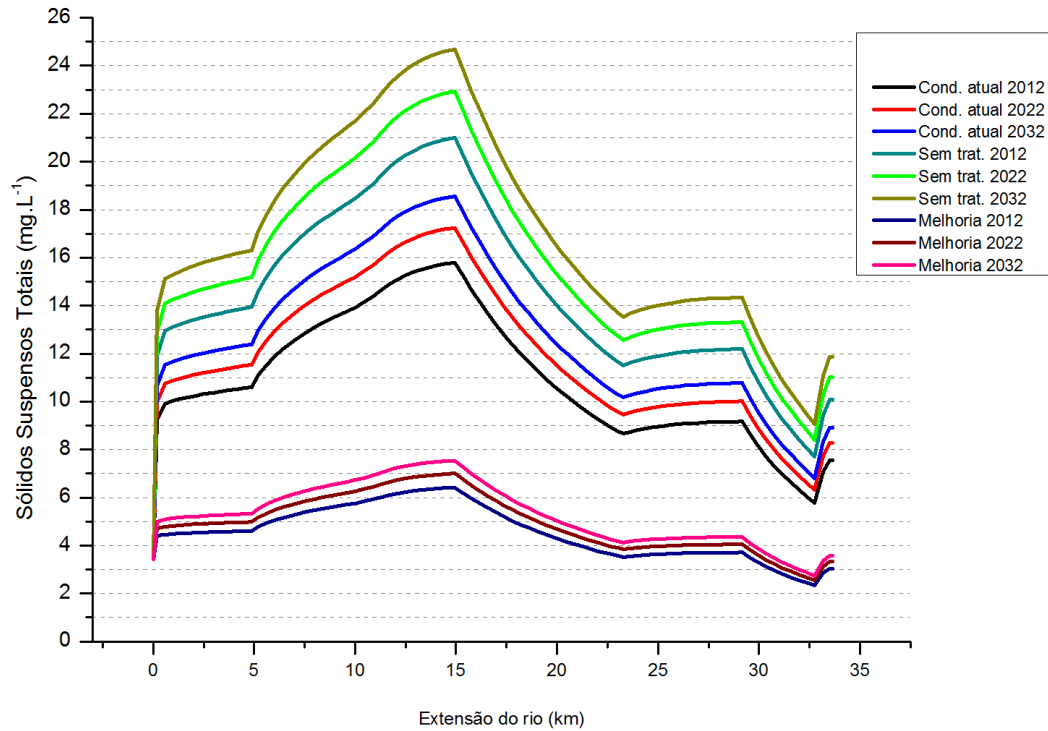


Figura 69 - Resultados das simulações dos cenários propostos para as concentrações de sólidos suspensos totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) durante o outono no rio Sorocabaçu.

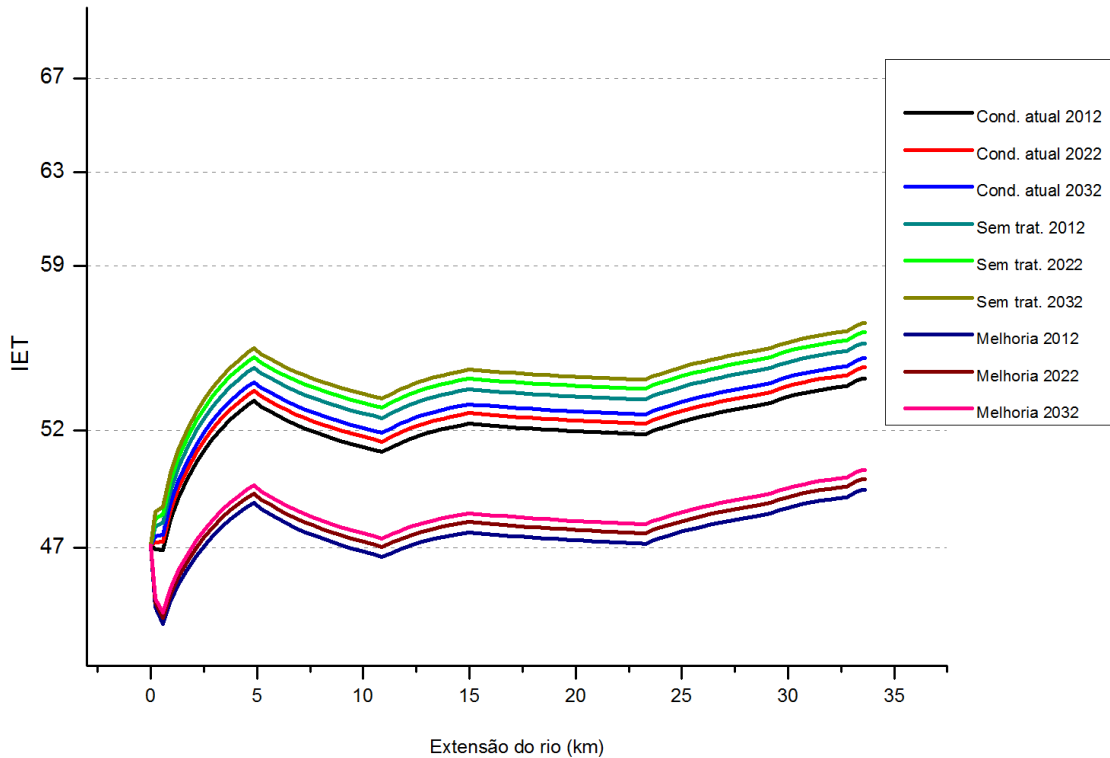


Figura 70 - Resultados das simulações dos cenários propostos para os índices de estado trófico durante o outono no rio Sorocabuçu.

#### 4.5.2.1 Discussão Geral dos Cenários Propostos.

Com estas informações foi possível verificar os diferentes comportamentos do rio Sorocabuçu no intervalo de um ano. Os trechos iniciais do rio (primeiros 3 quilômetros) demonstraram maiores variações nas concentrações dos parâmetros, o que pode ser um reflexo da sensibilidade da nascente perante ao uso e ocupação do ambiente na região. O percurso central do rio, que pode ser citado como o trecho que vai aproximadamente do quilômetro 5 ao 25, apresentou uma maior estabilidade em seus parâmetros. Já o trecho final se mostrou o mais impactado e com grandes variações nos padrões de qualidade da água, que pode ser atribuído à confluência do rio Sorocabuçu com os rios Una e Sorocamirim e também a influência do pulso de inundação (conceito elaborado por Junk et. al., 1989) no rio Sorocabuçu (R-08) e Sorocaba (R-09).

De acordo com os valores de referência propostos por Cunha, Dodds e Calijuri (2011), observando as variáveis de nutrientes, foi possível concluir que:

- i. As concentrações de NT não se adequaram a esta proposta se fossem mantidas as taxas de coleta e de tratamento atual do município de Ibiúna conforme visto no

Cenário 0. O mesmo resultado foi obtido observando os cenários de tratamento de coleta difusa, com exceção de um trecho que vai aproximadamente do ponto R-05 a R-07 durante o inverno e o verão para as populações de 2012 e 2022 (Figura 51 e Figura 61, respectivamente);

- ii. Para as concentrações de PT, com exceção do trecho inicial do rio que corresponde à nascente e dos cenários de tratamento da poluição difusa, a qualidade deste parâmetro não se adequou ao limite sugerido, chegando a apresentar valores superiores a 200% do mesmo nos trechos mais críticos (pontos R-03, R-08 e R-09).

Os cenários de oxigênio dissolvido atenderam a exigência estabelecida pela Resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) para rios de Classe 2 durante todos os períodos sazonais no que se diz respeito somente ao rio Sorocabuçu. Nos últimos quilômetros, que representam o rio Sorocaba, após a entrada dos rios Sorocamirim e Una e também do efluente da ETE de Ibiúna, em todas as simulações, a concentração de OD diminuiu consideravelmente até níveis inferiores ao estabelecido pela resolução CONAMA citada, exceto no período de inverno, com concentrações superiores a  $7,0 \text{ mg.L}^{-1}$  em todas as condições propostas. O comportamento deste parâmetro se mostrou similar durante as estações de inverno e outono, com maior estabilidade entre os cenários na primeira metade do rio e menor ao final do curso de água. Este fato não ocorreu para os cenários de verão e primavera, períodos estes onde ocorreram maiores influências relacionadas à precipitação pluviométrica e maiores temperaturas.

De acordo com as figuras apresentadas sobre as concentrações de sólidos suspensos totais, ficou evidente que no trecho central do rio (entre os quilômetros 13 e 29) existiu uma forte influência do uso e ocupação do solo, cuja principal atividade da região é a agricultura, com maiores concentrações durante o verão (até  $56 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Situação corroborada pela observação feita por SSE-CSAN (2010), que informou a existência de uma forte susceptibilidade à erosão na região do rio Sorocabuçu resultando no maior carreamento de partículas sólidas para o corpo de água principalmente durante o período chuvoso.

Considerando o cenário 0, o índice de estado trófico (IET) foi classificado como mesotrófico em todos os períodos sazonais, embora a nascente tenha apresentado menor IET em todos os cenários propostos, sendo, em alguns momentos, classificada como oligotrófico e até ultraoligotrófico. As projeções futuras para o mesmo índice de coleta e tratamento de esgoto indicaram um aumento no IET conforme o rio se estende, o qual se aproximou do valor limiar de eutrofia. Os valores deste índice apresentaram maiores valores durante as

estações mais chuvosas (primavera e verão) e menores durante os períodos secos (inverno e outono), o que já era esperado.

#### 4.6 Contribuição do rio Sorocabuçu em cargas de nutrientes e sólidos suspensos totais para o rio Sorocaba

Conforme descrito nos materiais e métodos, foram calculadas as contribuições na forma de carga diária de nitrogênio total, fósforo total, carbono total e sólidos suspensos totais. Os resultados obtidos foram comparados entre si a fim de quantificar a contribuição de cargas poluidoras do rio Sorocabuçu para o rio Sorocaba e, conseqüentemente para o reservatório de Itupararanga. Também foram comparados com o estudo de Cunha (2012), que realizou análises no mesmo ponto de coleta R-09 nos anos de 2009-2010 (Tabela 4).

Tabela 4 – Vazões e cargas de contribuição de carbono total, nitrogênio total, fósforo total e sólidos suspensos totais dos pontos de coleta R-07 (rio Sorocabuçu), R-09(rio Sorocaba) e do estudo de Cunha (2012).

| <b>Ponto de coleta</b>     | <b>Período sazonal</b> | <b>Vazão <math>m^3.s^{-1}</math></b> | <b>TC <math>t.dia^{-1}</math></b> | <b>NT <math>kg.dia^{-1}</math></b> | <b>PT <math>kg.dia^{-1}</math></b> | <b>SST <math>t.dia^{-1}</math></b> |
|----------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| R-07                       | Inverno                | 1,2                                  | 0,9                               | 111                                | 3                                  | 1,2                                |
|                            | Primavera              | 5,7                                  | 6,5                               | 949                                | 29                                 | 7,3                                |
|                            | Verão                  | 1,6                                  | 1,4                               | 152                                | 14                                 | 5,0                                |
|                            | Outono                 | 2,2                                  | 1,8                               | 128                                | 7                                  | 1,7                                |
|                            | <i>média</i>           | 2,7                                  | 2,6                               | 335                                | 13,3                               | 3,8                                |
| R-09                       | Inverno                | 3,2                                  | 3,0                               | 502                                | 24                                 | 5,2                                |
|                            | Primavera              | 20,7                                 | 23,5                              | 3391                               | 167                                | 20,8                               |
|                            | Verão                  | 5,9                                  | 7,4                               | 632                                | 42                                 | 13,4                               |
|                            | Outono                 | 5,1                                  | 5,4                               | 514                                | 22                                 | 3,3                                |
|                            | <i>média</i>           | 8,7                                  | 9,8                               | 1260                               | 64                                 |                                    |
| Cunha (2012)<br>(Sorocaba) | Inverno                | 6,4                                  | 4                                 | 558                                | 71                                 |                                    |
|                            | Primavera              | 20,3                                 | 18                                | 1908                               | 194                                |                                    |
|                            | Verão                  | 24,7                                 | 27,5                              | 1713                               | 244                                |                                    |
|                            | Outono                 | 12,7                                 | 10                                | 957                                | 47                                 |                                    |
|                            | <i>média</i>           | 16                                   | 15                                | 1284                               | 139                                |                                    |

Tabela 5 – Relação entre os pontos de coleta do rio Sorocabuçu (R-07) e rio Sorocaba (R-09) nos diferentes períodos sazonais. A vazão, as cargas de carbono total, nitrogênio total, fósforo total e sólidos suspensos totais representando a contribuição do rio Sorocabuçu ao Sorocaba estão expressas em %.

| <b>Relação</b>               | <b>Período</b> | <b>Vazão<br/>%</b> | <b>TC<br/>%</b> | <b>NT<br/>%</b> | <b>PT<br/>%</b> | <b>SST<br/>%</b> |
|------------------------------|----------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| R-07/R-09<br>(esta pesquisa) | Inverno        | 38                 | 29              | 22              | 13              | 24               |
|                              | Primavera      | 28                 | 28              | 28              | 17              | 35               |
|                              | Verão          | 27                 | 18              | 24              | 33              | 37               |
|                              | Outono         | 42                 | 33              | 25              | 34              | 51               |

Os dados observados na Tabela 4 indicaram que as maiores massas de nutrientes que o rio Sorocabuçu exporta para o rio Sorocaba foram de carbono total e de nitrogênio total, além de uma grande quantidade de sólidos suspensos.

Através da Tabela 5 foi possível verificar o percentual de contribuição do rio Sorocabuçu para o rio Sorocaba através da relação entre as variáveis dos pontos R-07 e R-09 durante o ano de 2011 e 2012.

Observou-se que durante os períodos de estiagem, a relação de vazão foi maior para a contribuição do rio Sorocabuçu para o Sorocaba, sendo 38% no inverno e 42% no outono, resultado esperado decorrente do menor regime de chuvas e, conseqüentemente, menor interferência da planície de alagamento do ponto R-08. Mesmo assim, proporcionalmente, o aporte de nutrientes referentes à estes períodos não foi superior aos de estações chuvosas (primavera e verão). Durante o inverno e outono, os valores médios de contribuição de nutrientes e de sólidos suspensos totais foram de 26% e 38%, ao passo que durante a primavera e o verão (que apresentaram menores índices de contribuição de volume de água) estes valores médios foram de 28% e 36%. Desta forma, verificou-se a interferência da planície de alagamento da região entre R-07 e R-09, que em períodos chuvosos contribuíram com um input de material alóctone para o rio Sorocaba.

Com relação ao mesmo ponto analisado por Cunha (2012), foram encontrados diferentes valores de vazão nos períodos sazonais com exceção da primavera. Durante este período, as cargas de carbono e nitrogênio foram inferiores no estudo deste pesquisador (op. cit.), o que pode indicar a influência da precipitação durante a primavera de 2011, onde ocorreram séries de chuva que somaram 130mm nos dias anteriores à coleta e evidenciar a variação esperada dos dados, respondendo à diferença temporal entre as coletas de cada pesquisa. Outra evidência desta variação foi que, durante a estação verão, a vazão e as cargas encontradas por Cunha (2012) foram aproximadamente 4 vezes maiores do que as encontradas nesta pesquisa.

## 5 CONCLUSÕES

Sabendo que as teorias ecológicas a respeito de rios não consideram as influências antrópicas, a que mais se aproxima às condições ambientais do rio Sorocabuçu (R-01 até R-08) é a do “River Continuum Concept” (VANNOTE, 1980). Thorp e Delong (1994) concluíram também que esta teoria é mais apropriada para rios pequenos. A partir do ponto R-08, quando o rio Sorocabuçu desagua no rio Sorocaba (R-09) e já se situa na área de influência do reservatório de Itupararanga, a teoria ecológica mais apropriada passa a ser a extensão do conceito de Ward e Stanford do “Descontínuo Fluvial” (1995), uma vez que o rio Sorocaba já não é considerado um corpo de água pequeno e que a teoria considera as interações entre o rio e a sua superfície de inundação.

A análise limnológica do rio Sorocabuçu permitiu concluir que houve uma entrada de nutrientes já nos pontos de amostragem R-02 e R-03 (alto curso), pouco distanciados da nascente. Este efeito pode ser atribuído ao despejo de esgoto doméstico e cargas provenientes da atividade agrícola, que é a principal fonte de renda da região. Entre os pontos R-03 e R-06 (médio curso), as concentrações oscilaram menos, indicando um trecho menos impactado. A partir do ponto R-07 (baixo curso), as concentrações de nutrientes voltaram a apresentar aumento por influência de dois fatores: i) proximidade com a área urbana do município e; ii) recebimento de material alóctone pela região de superfície de inundação (área de influência da represa de Itupararanga).

- O regime de precipitação exerceu forte influência na bacia do rio Sorocabuçu, apresentando diferentes resultados de qualidade da água nos períodos chuvosos e secos. Durante as estações chuvosas, ficaram evidentes as contribuições de poluição difusa no rio pela maior concentração das variáveis de sólidos suspensos totais e de nutrientes, advindos do carreamento de partículas e nutrientes da área de entorno do rio principalmente pela ação da chuva.
- O rio Sorocabuçu apresentou valores adequados à resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) para rios de Classe 2 em todos os parâmetros analisados, com exceção às concentrações de oxigênio dissolvido no ponto R-08 durante as coletas de

primavera, verão e outono. Todavia, as concentrações de oxigênio dissolvido foram altas durante o alto e médio curso do rio, tendenciando à precipitação de fósforo, o que foi verificado neste estudo e é característico de sistemas lóticos.

- Com relação aos valores de referência estudados por Cunha, Dodds e Calijuri (2011) para nitrogênio total e fósforo total, o rio Sorocabaçu não se adequou à estes limites mais restritivos. Isto indica um sinal de alerta para as concentrações destes parâmetros, pois o estudo realizado pelos autores (op. cit.) têm como base de dados rios do mesmo ecossistema e inclusive da mesma UGRHI que o rio Sorocabaçu.
- A capacidade de autodepuração do rio Sorocabaçu não suportará o crescimento populacional em conjunto com o crescimento urbano planejado do município de Ibiúna sem que haja a implantação de políticas públicas novas, direcionadas à manutenção do sistema aquático e à garantia dos usos múltiplos deste recurso hídrico. Os cenários propostos e apresentados neste estudo demonstraram estefato e o modelo QUAL2Kw pode ser uma ferramenta importante para os gestores do comitê de bacia da UGRHI-10 fornecendo subsídios que auxiliam na tomada de decisão pelos responsáveis.
- A partir das classificações dos índices de estado trófico, ficou evidente a variação do nível de trofia da nascente (ultraoligotrófica ou oligotrófica) para mesotrofia ainda em sua cabeceira, elevando o valor do índice durante seu eixo longitudinal no médio curso e apresentando tendências para níveis eutróficos na foz do rio Sorocabaçu e no rio Sorocaba. A influência do uso e ocupação do solo nesta bacia é significativa principalmente para estes índices no médio curso e a contribuição da população urbana de Ibiúna influencia principalmente no trecho próximo à foz. A utilização destas informações permitiu concluir que, apesar de não terem sido identificadas poluições pontuais no rio Sorocabaçu, a contribuição da poluição difusa o coloca em posição de alerta pela sua contribuição de nutrientes que elevam o índice de estado trófico do rio Sorocaba e, conseqüentemente, do reservatório de Itupararanga, uma vez que o rio Sorocabaçu é um dos seus principais formadores.

## 6 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Apesar de classificado como rio de Classe 2 pela resolução CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011), pôde-se verificar a potencialidade do rio Sorocabuçu em se enquadrar em uma classe ainda mais restritiva desta resolução - Classe 1, onde o único parâmetro que constantemente se manteve fora destas exigências durante todo o curso de água e que foi analisado neste estudo é o pH, sendo este levemente mais ácido do que o mínimo exigido pela norma (vide metodologia e resultados). Analisando estas informações e buscando a manutenção deste sistema aquático, acredita-se que para uma melhor gestão deste recurso hídrico deve-se dar foco:

- i) à melhoria no serviço de esgotamento sanitário na região de alto curso do rio Sorocabuçu;
- ii) à proteção da área de entorno no médio curso e maior fiscalização a respeito do uso de agrotóxicos;
- iii) ao estudo da influência da área de drenagem urbana do município de Ibiúna para a qualidade da água do rio Sorocabuçu, sendo esta possivelmente negativa, exigindo melhoria neste serviço.

Sabe-se que, ao optar pela utilização de modelos matemáticos, a proximidade da simulação com a realidade aumenta conforme a qualidade dos dados de entrada utilizados. Tendo em vista uma representatividade ainda maior no uso do modelo QUAL2Kw, recomenda-se a coleta e dados de dois parâmetros não medidos neste estudo:

- i) demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pela relação com o oxigênio dissolvido nas planilhas de calibração do modelo e pela ampla utilização deste parâmetro de análise na literatura para discussão de resultados, inclusive na resolução de classificação de corpos de água;
- ii) nitrogênio orgânico e amoniacal, pela utilização nas planilhas destes parâmetros de maneira isolada e não na forma de nitrogênio total kjeldahl (NTK).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos. (2001) Disponível em: [http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20061212102729\\_Introducao\\_Gerenciamento.pdf](http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20061212102729_Introducao_Gerenciamento.pdf). Acessado em: outubro/2011.

AGRA, FILHO. Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão. 1ª ed. Rio de Janeiro, 2013. Capítulo 27, 695-716p, 2013. ISBN 978-85-352-5954-4.

ANDERSEN, J. M. An ignition method for determination of total phosphorus in lake sediments. *Water Resources*, v. 10, p. 329-331, 1976.

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 25th Edition. Washington, APHA, 2005.

BECHMANN, M., DEELSTRA, J., STALNACKE, P., EGGESTAD, H. O., ØYGARDEN, L., Pengerud, A. Monitoring catchment scale agricultural pollution in Norway: policy instruments, implementation of mitigation methods and trends in nutrient and sediment losses. *Environmental Sciences & Policy*, v. 1, p. 102-114, 2008.

BENASSI, S. F. Estudo das variáveis limnológicas e do processo da autodepuração na Descontinuidade Serial do ribeirão Bonito (SP). Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

BENEDETTI, L. et. al. Environmental and economic performance assessment of the integrated urban wastewater system. *Journal of Environmental Management*, v. 88, p. 1262-1272, 2008.

BORDALO, A. A.; NILSUMRANCHIT, W.; CHALERMVAT, K. Water quality and uses of Bangpakong River (Eastern Thailand). *Water Research*, v. 35, n. 15, p. 3635-3642, 2001.

BOTTINO, F. Estudo experimental e matemático de qualidade da água com base na ecidrologia fluvial de pequenas bacias: estudo de caso do rio Canha, Baixo Ribeira de Iguape, SP. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2008.

BOTTINO, F. et al. Calibration of QUAL2K model in Brazilian micro watershed: effects of the land use on water quality. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 22, n. 4, p. 474-485, 2010.

BRASIL. Política Nacional dos Recursos Hídricos. Lei número 9.433 de 8 de janeiro de 1997 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente, 1997.

BRASIL. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: fevereiro/2013.

CALIJURI, M.C.; BUBEL, A.P.M. Conceituação de Microbacias. In: LIMA, W.P. e ZAKIA, M.J.B. (eds) *As Florestas Plantadas e a Água: implementando o conceito de microbacia hidrográfica como unidade de planejamento*. 1ª ed. São Carlos – SP: Ed. Rima, 226p, 2006.

CALLISTO, M.; GONÇALVES JÚNIOR, J. F.; MORENO, P. Invertebrados Aquáticos como Bioindicadores. In: Goulart, E. M. A. (Org.). *Navegando o Rio das Velhas das Minas aos Gerais*. Belo Horizonte, vol. 1, p. 555-567, 2005.

CÂMARA, C. D.; LIMA, W.; ZÁKIA, M. J. B. Critérios e Indicadores Hidrológicos de Monitoramento em Microbacias. In: LIMA, W.P. e ZAKIA, M.J.B. (eds) *As Florestas Plantadas e a Água: implementando o conceito de microbacia hidrográfica como unidade de planejamento*. 1ª ed. São Carlos – SP: Ed. Rima, 226p., 2006.

CAMPAGNA, A. F. Toxicidade dos sedimentos da bacia hidrográfica do rio Monjolinho (São Carlos – SP): ênfase nas substâncias cobre, aldrin e heptacloro. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 281p, 2005.

CARLSON, R.E.; SIMPSON J. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. Vol 22 (2), p 361-369, 1977.

CHAPRA, S.C., PELLETIER, G. J.; TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA, 2008.

CHARBONNEAU, P.; KNAPP, B. A user's guide to PIKAIA 1.0. NCAR Technical Note 418+ IA. National Center for Atmospheric Research, Boulder, 1995.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Relatório de qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo. 2011. 342p., 2011.

COX, B. A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *The Science of the Total Environment*, United Kingdom, v. 314-316, p. 335-377, 2003.

CUNHA, D. G. et. al. Comparação entre as características químicas do sedimento dos rios Jacupiranga, Jacupiranguinha, Pariquera-Açu e Canha, vale do Ribeira de Iguape, SP. In: CALIJURI, M. C.; MIWA, A. C. P.; FALCO, P. B. (Eds). *Subsídios para a sustentabilidade dos recursos hídricos: um estudo de caso em sub-bacias do Baixo Ribeira e Iguape, São Paulo, Brasil*. São Carlos: EESC, Cap. 6, p. 109-121, 2009.

CUNHA, C. A. G. A sub-bacia do rio Jacupiranga: análise dos aspectos sócio-econômicos e ambientais como subsídio para o manejo sustentável da região do Vale do Ribeira de Iguape, São Paulo. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2010.

CUNHA, D. G. F. Heterogeneidade espacial e variabilidade temporal do reservatório de Ituparanga: uma contribuição ao manejo sustentável dos recursos hídricos da bacia do rio

Sorocaba (SP). Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2012.

CUNHA, D. G. F.; DODDS, W. K.; CALIJURI, M. C. Defining Nutrient and Biochemical Oxygen Demand Baselines for Tropical Rivers and Streams in São Paulo State (Brazil): A Comparison Between Reference and Impacted Sites. *Environmental Management*, v. 48, p. 945-956, 2011.

CUNHA, D. G. F.; OGURA, A. P.; CALIJURI, M. C. Nutrient reference concentrations and trophic state boundaries in subtropical reservoirs. *Water Science & Technology*, 65.8, 1461-1467, 2012.

DREWRY, J.J.; NEWHAM, L. T. H.; CROKE, B. F. W. Suspended sediment, nitrogen and phosphorus concentrations and exports during storm-events to the Tuross estuary, Australia. *Journal of Environmental Management*, v. 90, p. 879-887, 2009.

ELWOOD, J.W. et al. Resource spiraling: an operational paradigm for analyzing lotic ecosystem. In: FONTAINE, D.; BARTELL, S.M. (Eds.) *Dynamic of lotic ecosystem*. Ann Arbor: Ann arbor Science, p.3-27, 1983.

EVANSON, M.; AMBROGE, R. F. Sources and growth dynamics of fecal indicator bacteria in a costal wetland system and potential impacts to adjacent waters. *Water Research*, v. 40, p. 475-486., 2006.

FRACALANZA, A.P. Água: de elemento natural a mercadoria. *Sociedade & natureza*, Uberlândia, v.17, n. 33, p. 21-36, 2005.

FERNANDES, M. M. et. al. Influência do uso do solo na qualidade de água da microbacia Glória, Macaé – RJ. *Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal*, v. 8, n. 2, p. 105-116, 2011.

FERRAZ, I. C. Estudo da comunidade bentônica como ferramenta bioindicadora da qualidade da água em um rio de pequena ordem (Rio Canha, Baixo Ribeira de Iguape, SP). *Dissertação (Mestrado)*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2008.

HOPE, D; BILLET, M. F.; CRESSER, M. S. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. *Environmental Pollution, United Kingdom*, v. 84, p. 301-324, 1993.

HOPE, D; BILLET, M. F.; CRESSER, M. S. Exports of organic carbon in two river systems in NE Scotland. *Journal of Hydrology, United Kingdom*, v. 193, p. 61-82, 1996.

IBGE (2010). Censo demográfico do município de Ibiúna. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acesso em: agosto/2011.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Plano de Bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Sorocaba e Médio Tiete (UGRHI10), 2006. Disponível em:

<[http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/RELATORIO/CRH/CBH-SMT/1126/reltec\\_91%20265-205.pdf](http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/RELATORIO/CRH/CBH-SMT/1126/reltec_91%20265-205.pdf)>. Acessado em: outubro/2011.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Relatório Técnico N° 104.269-205. 328p., 2008.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Mapa 6 – Síntese das informações de interesse aos recursos hídricos. Sub-Bacia 6 – Alto Sorocaba, 2011. Endereço: [http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/RELATORIO/CRH/CBH-SMT/1126/mapasintese\\_subbacia06.pdf](http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/RELATORIO/CRH/CBH-SMT/1126/mapasintese_subbacia06.pdf). Acessado em: outubro/2011.

JONES, J. R.; KNOWLTON, M. F. Suspended solids in Missouri reservoirs in relation to catchment features and internal processes. *Water Research*, v. 39, p. 3629-3635, 2005.

JUDOVÁ, P.; JANSKÝ, B. Water quality in rural areas of the Czech Republic: key study Slapanka River catchment. *Limnologica*, v. 35, p. 160-168, 2005.

JUNK, W.J.; BAYLEY, P.B. & SPARKS, R.E. The Flood Pulse Concept in river-floodplain systems. *Can. Spec. Publ. Aquat. Sci.*, v.106, p. 110-127, 1989.

KANNEL, P. R. et. al. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*, v. 202, p.503-517, 2007.

LAMPARELLI, M. C. Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. 238p. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências, São Paulo, 2004.

LI, S.; GU, S.; LIU, W.; HAN, H.; ZHANG, Q. Water quality in relation to land use and land cover in the upper Han River Basin, China. *Catena*, v. 75, p. 216-222, 2008.

LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. Saúde Ambiental da Microbacia. In: LIMA, W.P. e ZAKIA, M.J.B. (eds) *As Florestas Plantadas e a Água: implementando o conceito de microbacia hidrográfica como unidade de planejamento*. 1ª ed. São Carlos – SP: Ed. Rima, 226p., 2006.

MARCIANO, F.T. Estudo limnológico da bacia do rio Sorocaba (SP) e utilização do índice de integridade biótica da comunidade de peixes para avaliação ambiental. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2001.

MATSUDA, Y. Avaliação da contribuição de sólidos suspensos de sistemas lóticos para o Reservatório Itupararanga, bacia hidrográfica do Rio Sorocaba (SP). São Carlos: EESC-USP, 53p., 2010.

MEYBECK, M.; KIMSTACH, V.; HELMER, R. Strategies For Water Quality Assessment. In: CHAPMAN, D. (ed) *Water Quality Assessments: A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. 2ª ed. London – UK. Capítulo 2, 23-57p., 1996. ISBN 0-419-21590-5 (HB).

MEYBECK et. al. (1996). Rivers. In: CHAPMAN, D. (ed) Water Quality Assessments: A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2ª ed. London – UK, Capítulo 6, 243-314p., 1996. ISBN 0-419-21590-5 (HB).

MOCCELLIN, J. A microbacia do rio Jacupiranguinha como unidade de estudo para a sustentabilidade dos recursos hídricos no Baixo Ribeira de Iguape – SP. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2006.

MOCCELLIN, J. Estudo da dinâmica fluvial em sub-bacias e proposição de cenários para a sustentabilidade dos recursos hídricos no baixo Ribeira do Iguape, SP. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2010.

MOITA, R.; CUDO, K. Aspectos gerais da qualidade da água no Brasil. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO E SAÚDE NO BRASIL, 1991, Brasília. Anais... Brasília: Ministério da Saúde, Secretaria do Meio Ambiente, p.1-6., 1991.

MONTGOMERY, D. R. Process domains and the river continuum. Journal of the American water resources association, v. 35, n. 2, p. 397-410, 1999.

NEN – Nederlandse Norm. NEN 6520. Norma holandesa sobre determinação de clorofila a pelo método do etanol. 1981.

NEWBOLD, J. D. et al. Phosphorus dynamics in a woodland stream ecosystem: a study of nutrient spiraling. Ecology, Oak Ridge, v. 64, n.5, p. 1249-1265, 1983.

NUSH, E. A. (1980). Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. Arch. Hydrobiologia, v. 14, p. 14-36.

PELLETIER, G. J.; CHAPRA, S. C.; TAO H. QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. Environmental Modelling & Software, v. 21, p. 419-425., 2006.

REDE DAS ÁGUAS. Caracterização geral da UGRHI-10. 2000. Disponível em: [www.rededasaguas.org.br/comite/relsmstseg.pdf](http://www.rededasaguas.org.br/comite/relsmstseg.pdf). Acesso em: agosto/2011.

RIOS, L. Estudo limnológico e fatores ecológicos em ribeirões e córregos da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão (Estado de São Paulo). Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 1993.

SALLES, M.H.D.; CONCEIÇÃO, F.T.; ANGELUCCI, V.A.; SIA, R.; PEDRAZZI, F.J.M.; CARRA, T.A.; MONTEIRO, G.F.; SARDINHA, D.S.; NAVARRO, G.R.B. Avaliação simplificada de impactos ambientais na bacia do Alto Sorocaba (SP). Revista de Estudos Ambientais, v. 10, n. 1, p. 6-20, 2008.

SASAKI, A.; ITO, A.; AIZAWA, J.; UMITA, T. Influence of water and sediment quality on benthic biota in an acidified river. Water Research, v. 39, p. 2517-2516., 2005.

SARDINHA, D.S.; CONCEIÇÃO, F.T.; SOUZA, A.D.G.; SILVEIRA, A.; JULIO, M.; GONÇALVES, J.C.S.I. Avaliação da qualidade de água e autodepuração do ribeirão do meio, Leme (SP). Eng. Sanit. Ambient, v. 13, n 3, p. 329-338., 2008a.

SARDINHA, D.S.; CONCEIÇÃO, F.T.; BONOTTO, D.M.; SALLES, M.H.D.; ANGELUCCI, V.A. Avaliação de balanço anual de cátions e ânions na bacia do Alto Sorocaba (SP). Revista Brasileira de Geociências, v. 38, n. 4, p. 730-740., 2008b.

Secretaria de Estado de Saneamento e Energia de São Paulo. Descrição dos sistemas existentes e projetados e avaliação da prestação dos serviços de saneamento básico: Apoio técnico à elaboração dos planos municipais de saneamento e elaboração do plano regional de saneamento para os municípios da Bacia Hidrográfica dos Rios Sorocaba e Médio Tietê – UGRHI 10. 77p., 2010.

SETTI, A.A. et al. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. 2ª ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, novembro 2001. 207p.

SILVA, (2009). Disponível em: <<http://www2.ufersa.edu.br/portal/laboratorios/limnoaqua/1737>>. Acesso em: mar, 2013.

SILVA, A. M. M., SACOMANI, L. B. Using chemical and physical parameters to define the quality of Pardo River water (Botucatu – SP – Brazil). Water Research, v. 35, n. 6, p. 1609-1616., 2000.

Sistema Estadual de Análise de Dados - SEADE. Informações dos municípios paulistas referente a Ibiúna, 2011. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br>> (acesso em 02/2013).

TOCKNER, K.; MALARD, F.; WARD, J. V. An extension of the flood pulse concept. Hydrological Processes, Switzerland, v.14, p.2861-2883, 2000.

THORP, J. H.; DELONG, M. D. The Riverine Productivity Model: An Heuristic View of Carbon Sources and Organic Processing in Large River Ecosystems. Oikos, v.70, p.305-308, 1994.

THORP, J.H.; THOMS, M. C.; DELONG, M. D. The riverine ecosystem synthesis: biocomplexity in river networks across space and time. River Research and Applications, v. 22, p. 123-147, 2006.

TOLEDO Jr., A.P.; TALARICO, M.; CHINEZ, S.J.; AGUDO, E.G. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: Anais do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. Camboriú, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária. Camboriú (SC), 34p., 1983.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 943p., 2009.

TUDESQUE, L.; GEVREY, M.; GRENOUILLET, G.; LEK. S. Long-term changes in water physicochemistry in the Adour-Garonne hydrographic network during the last three decades. Water Research, v. 42, p. 732-742., 2008.

TURNER, D. F.; PELLETIER, G. J.; KASPER, B. Dissolved Oxygen and pH Modeling of a Periphyton Dominated, Nutrient Enriched River. *Journal of Environmental Engineering*, p. 646-652., 2009.

VANNOTE, J.L.; MINSHALL, G.W.; CUMMINS, K.W.; SEDELL, J.R. & CUSHING, C.E. The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, v. 37, n 1, p. 130-137., 1980.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1 . Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. 2ª ed. Revisada. 243p., 1996.

WARD, J. V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society, Colorado*, v. 8, n. 1, p. 2-8, 1989.

WARD, J.V. & STANFORD, J.A. The Serial Discontinuity Concept in Lotic Ecosystems. In: FONTAINE, T.D. & BARTHELL, S.M., (Eds.) *Dynamic of lotic ecosystems*. Ann Arbor Scien. Publ., Ann Arbor. Michigan, p.347-356., 1983.

WARD, J. V.; STANFORD, J. A. The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers. *Regulated rivers research & management, Colorado*, v. 10, p. 159-168, 1995.

WISLER, C.O. & BRATER, E.F *Hidrologia*. Tradução e publicação de Missão Norte Americana pela Cooperação Econômica e Técnica no Brasil. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1964.