

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

**BÁRBARA FERNANDA SOARES DE OLIVEIRA E SILVA**

**INFLUÊNCIA DE AFLUENTES NO ESCOAMENTO E ESTUDO DA DISPERSÃO  
E ABSORÇÃO DE POLUENTES EM RIOS (UM ESTUDO DE CASO NO RIO  
PARAÍBA DO SUL)**

Lorena

2019

BÁRBARA FERNANDA SOARES DE OLIVEIRA E SILVA

**INFLUÊNCIA DE AFLUENTES NO ESCOAMENTO E ESTUDO DA DISPERSÃO  
E ABSORÇÃO DE POLUENTES EM RIOS (UM ESTUDO DE CASO NO RIO  
PARAÍBA DO SUL)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a conclusão da Graduação do curso de Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Estaner Claro Romão

Lorena

2019

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

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Bárbara Fernanda Soares de Oliveira e  
Influência de afluentes no escoamento e estudo da  
dispersão e absorção de poluentes em rios (um estudo  
de caso no rio paraíba do sul) / Bárbara Fernanda  
Soares de Oliveira e Silva; orientador Estaner  
Claro Romão. - Lorena, 2019.  
44 p.

Monografia apresentada como requisito parcial  
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia  
Ambiental - Escola de Engenharia de Lorena da  
Universidade de São Paulo. 2019

1. Simulação numérica. 2. Rio paraíba do sul. 3.  
Afluentes. 4. Poluição ambiental. I. Título. II.  
Romão, Estaner Claro, orient.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Ubiratan Domingos e Antônia Soares, pessoas incríveis que sempre me incentivaram e me ajudaram nessa jornada. Neles se encontram minha inspiração e minha razão para continuar. Espero um dia recompensá-los por todo amor e toda dedicação que sempre tiveram e ainda têm por mim e por meus irmãos durante todos esses anos.

Agradeço ao Prof. Dr. Estaner Claro Romão que me acompanhou durante grande parte da minha graduação. Agradeço toda paciência, todo aprendizado, toda atenção e todo suporte dados neste trabalho e em outros projetos.

Agradeço à professora Ana Gabas pelo suporte na disciplina de Trabalho de Graduação e por colaborar na elaboração deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Darcy Nunes Vilella Filho e à Prof<sup>a</sup>. Dra. Roberta Veloso Garcia pela disponibilidade na participação da banca avaliadora e pelas sugestões de melhorias dadas a este trabalho.

Agradeço aos meus queridos amigos feitos antes e durante essa graduação. Todos são como flores que enfeitam meu caminho. Com eles, vejo que sem alegria, amor e companheirismo não se chega a lugar algum. Minha gratidão por todo carinho e todos os momentos felizes juntos.

Por último, e não menos importante, agradeço a Deus por me permitir encontrar cada uma das pessoas citadas anteriormente e também outras pessoas que, em diversos contextos, me ensinaram algo e colaboraram com a minha formação e para que eu seja quem eu sou hoje.



## RESUMO

SILVA, B. F. S. O e **Influência de afluentes no escoamento e estudo da dispersão e absorção de poluentes em rios (Um estudo de caso no rio Paraíba do Sul)**. 2019 44p. TCC (Graduação) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

Dentre os diversos problemas ambientais vivenciados atualmente pelo ser humano, a escassez de água potável é um dos mais preocupantes. Para ser consumida pela população ou utilizada por indústrias, a água deve passar por um tratamento que é feito de acordo com a sua qualidade, portanto melhorar o abastecimento de água e preservar a qualidade desse recurso natural tem se tornado prioridade para se garantir um futuro mais sustentável. Dentro da engenharia, os estudos do escoamento de fluidos e da transferência de massa nos ajudam a entender como diversos fenômenos naturais ocorrem. O objetivo desse trabalho consiste em estudar a influência de afluentes na variação da velocidade em um trecho do rio Paraíba do Sul, bem como a dispersão e a absorção de poluentes nesse mesmo trecho. As simulações foram feitas a partir do Software COMSOL, que permite definir uma geometria e realizar situações de entrada de afluentes e de espécies químicas. Com a definição da geometria do trecho a ser estudado, a partir de imagens de satélite, foram realizadas simulações com variações de velocidade que permitiram visualizar como as velocidades dos afluentes existentes no trecho influenciam na velocidade do curso principal e como esse escoamento se comporta ao longo do tempo. Posteriormente, foram realizadas simulações que envolviam o transporte e a absorção de uma espécie química ao longo do trecho definido. A substância escolhida foi o nitrogênio amoniacal e a partir dela foram feitas estimativas de absorção por plantas aquáticas e foi definida uma concentração para o seu despejo no domínio, buscando aproximar ao máximo essa simulação da realidade. Os resultados obtidos nos mostram que quanto maior a velocidade dos afluentes, maior a velocidade no curso principal do rio e que a absorção e dispersão de poluentes em um rio ocorrem, porém estão relacionadas não só aos fatores considerados no estudo, mas à outros diversos fenômenos naturais e às dimensões do rio e da fonte poluidora.

Palavras-chave: Simulação Numérica, Rio Paraíba do Sul, Afluentes, Poluição Ambiental

## ABSTRACT

SILVA, B. F. S. O e **Influence of tributaries in the flow and study of dispersion and absorption of pollutants into rivers (A case study on the river Paraíba do Sul)**. 2019 44p. TCC (Graduação) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

Among several environmental problems currently experienced by humans, the shortage of potable water is one of the most worrying. To be consumed by the population or used by the industry, the water must undergo treatment which is done according to its quality, so improving the water supply and preserving the quality of this natural resource has become a priority to ensure a more sustainable future. Inside engineering, the studies of fluid flow and mass transfer help us to understand how various natural phenomena occur. The objective of this work is to study the influence of tributaries in velocity variation on a stretch of river Paraíba do Sul, as well as the dispersion and absorption of pollutants on the same stretch. The simulations were done in the software COMSOL, which allows to define the geometry and to perform situations of tributaries and entry of chemical species. With the definition of the geometry of the stretch to be studied, from satellite images, simulations were performed with variations of velocity that allowed to visualize how the velocities of the tributaries in the stretch influence the velocity of the main course and how this flow behaves along of time. Subsequently, simulations were made involving the transport and absorption of a chemical species along the defined stretch. The chosen substance was ammoniacal nitrogen and from it were made estimates of absorption by aquatic plants and a concentration was defined for its dumping in the domain, trying to get as close as possible this simulation of reality. The results show that the higher velocity of the tributaries, the greater the velocity in the main course of the river and dispersion of pollutants in a river occur, but are related not only to the factor considered in the study, but also to other phenomena and to the sizes of the river and the source of pollution.

Keywords: Numerical Simulation, River Paraíba do Sul, Tributaries, Environment Pollution



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem nas proximidades da USP, área I, com o Rio Paraíba do Sul. .	11
Figura 2. Afluente que atravessa a cidade de Lorena desembocando no Rio Paraíba do Sul. ....	12
Figura 3. Característica da tela do computador ao abrir o software COMSOL. ....	23
Figura 4. Opções de dimensão para o modelo. ....	24
Figura 5. Tipos de fenômenos físicos simulados no COMSOL. ....	24
Figura 6. Tipos de estudos disponíveis no COMSOL. ....	25
Figura 7. Aparência do COMSOL após definidas algumas características básicas do modelo. ....	26
Figura 8. Domínio importado para o COMSOL com os afluentes sinalizados e enumerados. ....	27
Figura 9. Imagem ampliada de parte da malha que constitui domínio. ....	27
Figura 10. Pontos inseridos para monitoramento da velocidade do escoamento no trecho próximo ao afluente 1. ....	28
Figura 11. Pontos inseridos para monitoramento da velocidade do escoamento no trecho próximo aos afluentes 2, 3 e 4. ....	28
Figura 12. Perfil de velocidade no instante $t = 0$ s ( $V_a = 2$ m/s e $V_b = 0,4$ m/s). ....	30
Figura 13. Perfil de velocidade no instante $t = 8000$ s ( $V_a = 2$ m/s e $V_b = 0,4$ m/s). ....	30
Figura 14. Gráfico da variação de $V$ nos pontos A e B em função de $V_a$ no instante $t = 2000$ s. ....	31
Figura 15. Gráfico da variação de $V$ nos pontos A e B em função de $V_a$ no instante $t = 8000$ s. ....	31
Figura 16. Gráfico da variação de $V$ nos pontos C, D, E e F em função de $V_a$ no instante $t = 2000$ s. ....	32
Figura 17. Gráfico da variação de $V$ nos pontos C, D, E e F em função de $V_a$ no instante $t = 8000$ s. ....	32
Figura 18. Comparação entre os perfis para $V_a = V_b = 0$ (à esquerda) e $V_a = 2$ m/s e $V_b = 0,4$ m/s (à direita) nas regiões dos pontos A e B. ....	33
Figura 19. Comparação entre os perfis para $V_a = V_b = 0$ (à esquerda) e $V_a = 2$ m/s e $V_b = 0,4$ m/s (à direita) nas regiões dos pontos C, D, E e F. ....	34
Figura 20. Gráfico da variação de $C$ no ponto A ao longo do tempo $t$ para cada valor de $V_1$ . ....	37
Figura 21. Gráfico da variação de $C$ no ponto B ao longo do tempo $t$ para cada valor de $V_1$ . ....	38
Figura 22. Gráfico da variação de $C$ no ponto C ao longo do tempo $t$ para cada valor de $V_1$ . ....	39
Figura 23. Gráfico da variação de $C$ no ponto D ao longo do tempo $t$ para cada valor de $V_1$ . ....	40
Figura 24. Gráfico da variação de $C$ no ponto E ao longo do tempo $t$ para cada valor de $V_1$ . ....	40

Figura 25. Gráfico da variação de C no ponto F ao longo do tempo t para cada valor de V1..... 41

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>13</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
<b>4. OBJETIVOS.....</b>	<b>20</b>
4.1. Objetivos Gerais.....	20
4.2. Objetivos Específicos.....	20
<b>5. METODOLOGIA .....</b>	<b>22</b>
5.1. Equação Modelo .....	22
5.2. Software COMSOL .....	23
<b>6. APLICAÇÃO NUMÉRICA.....</b>	<b>29</b>
6.1. Estudo do escoamento .....	29
6.2. Estudo da dispersão e absorção de nutrientes .....	34
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>43</b>



## 1. Introdução

As diversas atividades relacionadas à engenharia, e as pesquisas relacionadas a ela, não são motivadas única e exclusivamente pela curiosidade humana, mas principalmente por necessidades reais, que muitas vezes precisam ser resolvidas com rapidez e precisão. O estudo de escoamento e transporte de espécies químicas em fluidos é de grande importância em vários ramos da engenharia, em especial podemos destacar a Engenharia Ambiental que dentre suas principais atividades está a busca da melhoria do abastecimento de água.

É sabido que a realidade mundial é de escassez de água potável, e sendo assim entender as várias maneiras de abastecimento de água, aproveitamento da água e conservação da mesma é de suma importância para sobrevivência humana. Neste projeto propõe-se estudar a influência da existência de afluentes em um trecho de rio, bem como o comportamento de possíveis poluentes despejados nesse trecho. Como exemplo, podemos utilizar a Figura 1, onde temos um trecho do Rio Paraíba do Sul, nas proximidades da Área I da EEL-USP.

**Figura 1.** Imagem nas proximidades da USP, área I, com o Rio Paraíba do Sul.



Fonte: Google Maps.

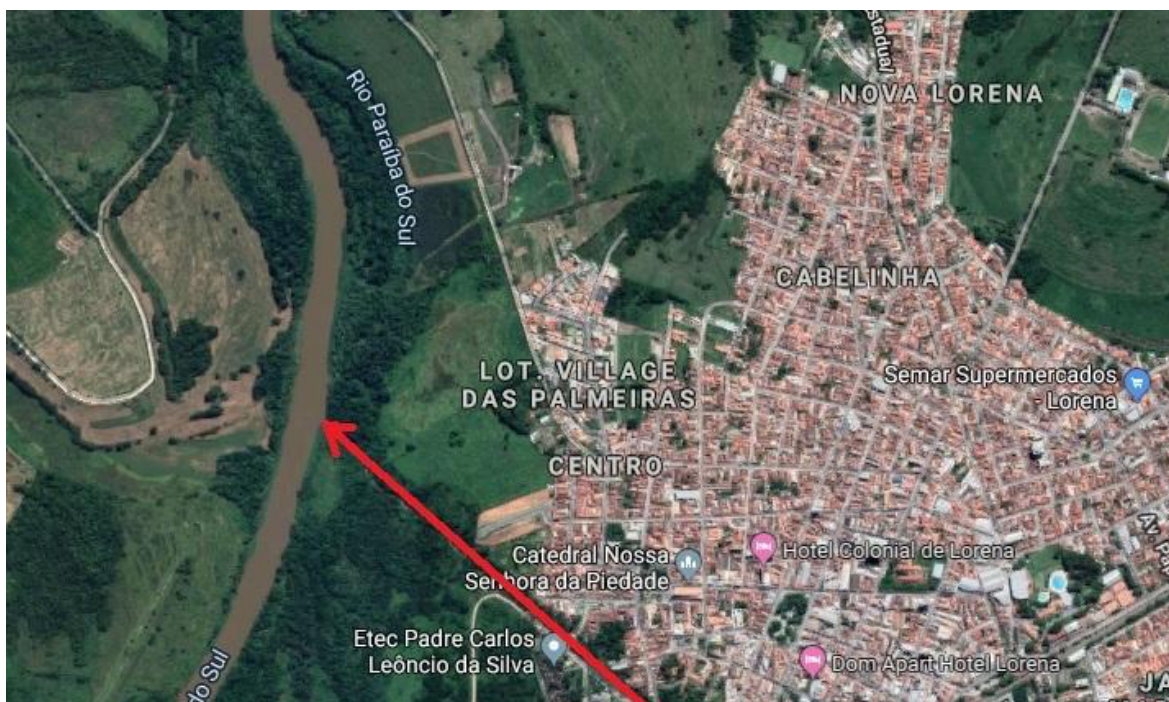
Veja pelo retângulo pontilhado que temos um trecho do rio com uma geometria muito próxima de um retângulo e dois afluentes simbolizados pelas setas. A intenção inicial deste trabalho é analisar qual a influência destes afluentes no escoamento natural do rio, ou seja, qual a quantidade de afluentes,

qual a largura do afluente, qual a velocidade de chegada do afluente no rio que possam influenciar significativamente no escoamento deste rio.

Este projeto visa dar-nos um conhecimento importante desta questão, para que na sequência seja possível inserir juntamente com o cômputo do escoamento a transferência de massa, e assim podermos analisar a dispersão de poluentes provindas de afluentes. Veja na Figura 2, um outro afluente desembocando no Rio Paraíba do Sul, o Ribeirão Taboão que atravessa a cidade de Lorena.

Neste afluente (Figura 2), em um segundo momento, poderíamos inserir situações nas quais pudéssemos analisar a dispersão de poluentes provindas de despejo de esgoto neste afluente que desemboca no Rio Paraíba do Sul. Nesta vertente e também com relação ao escoamento, foi feita uma revisão bibliográfica buscando artigos em revistas ou em jornais, ou até mesmo em páginas de internet, na qual possamos ter uma noção de como se comporta, normalmente a velocidade do Rio Paraíba do Sul e se possível de seus afluentes. Esta revisão inicial é apresentada no item 3.

**Figura 2.** Afluente que atravessa a cidade de Lorena desembocando no Rio Paraíba do Sul.



Fonte: Google Maps.

## **2. Justificativa**

Devido ao aumento na demanda de água potável, seja para abastecimento da população ou para a utilização em instalações industriais, a qualidade da água captada em rios é de suma importância, pois a partir da sua qualidade é selecionado o tratamento mais adequado e viável financeiramente. O estudo da influência de um ou mais afluentes no escoamento de um rio, no caso o Rio Paraíba do Sul, visa auxiliar e simplificar futuros estudos que podem ser realizados com relação à dispersão de poluentes, bem como a concentração dos mesmos em corpos de água.

### **3. Revisão Bibliográfica**

#### **a. Aspectos físicos do Rio Paraíba do Sul**

Localizado na região Sudeste do Brasil, o Rio Paraíba do Sul é formado pela junção dos rios Paraibuna e Paraitinga, que nascem na Serra da Bocaina, nos municípios de Cunha e Areias, respectivamente. Seu curso percorre de leste a oeste entre as serras da Mantiqueira e do Mar. Depois de percorrer parte do estado de São Paulo, segue em direção ao estado do Rio de Janeiro, percorrendo todo o Vale do Paraíba, e no município de São João da Barra (RJ), desemboca no Oceano Atlântico, totalizando 1150 km de extensão. Os principais afluentes do rio Paraíba do Sul na margem esquerda são: Jaguarí, Paraibuna, Pirapetinga, Pomba e Muriaé; e na margem direita: Bananal, Piraí, Piabanha e Dois Rios, segundo informações encontradas no Relatório Técnico de 2011 da Agência da Bacia do Rio Paraíba – AGEVAP (AGEVAP, 2011).

Ainda de acordo com o Relatório Técnico de 2011 – AGEVAP, ao longo do seu curso, o Rio Paraíba do Sul apresenta características diferenciadas podendo ser dividido em curso superior, curso médio superior, curso médio inferior e curso inferior. No curso superior o rio possui 317 km, medidos da nascente até a cidade de Guararema (SP), apresenta fortes declives e regime de chuva torrencial; o curso médio superior se inicia na cidade de Guararema e se estende até a cidade de Cachoeira Paulista (SP), totalizando 208 km de extensão. O terreno nesse trecho é menos acidentado, apresentando grandes várzeas, porém o rio é sinuoso, ou seja, possui um curso meandrante; O curso médio inferior é considerado o maior do rio, com 480 km de extensão, iniciando-se na cidade de Cachoeira Paulista (SP) e seguindo até a cidade de São Fidélis (RJ). Sua extensão apresenta trechos encachoeirados; O curso inferior possui 96 km e se estende da cidade de São Fidélis (RJ) até a foz do rio, localizada no município de São João da Barra (RJ), ou seja, é seu trecho final (AGEVAP, 2011).



## **b. Histórico da região**

De acordo com os dados gerais sobre a bacia do Rio Paraíba do Sul, segundo o CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, a civilização indígena ocupou a região da bacia por mais de mil anos durante o período pré-colonial, segundo estudos arqueológicos, e seu impacto na natureza não foi significativo (CEIVAP, 2015).

Com a colonização do Brasil e o início do ciclo do ouro em Minas Gerais no século XVI, o vale serviu como corredor comercial ligando o estado de Minas à costa paulista, obtendo, assim, suas primeiras estradas e a formação dos primeiros povoados. Após a queda do ouro, no final do século XVIII, o desmatamento da região tomou força devido à substituição da dinâmica comercial anterior pelas culturas do café e cana-de-açúcar, alterando de forma radical a paisagem do vale. Com o fim da escravatura no século XIX e os sinais de cansaço do solo, houve um declínio nas culturas de café e, posteriormente, nas culturas de cana-de-açúcar, abrindo espaço para a criação de gado leiteiro (CEIVAP, 2015).

Devido à boa estrutura de transportes resultadas dos períodos comerciais anteriores, após a crise do café e da cana-de-açúcar, a região da bacia iniciou um processo de industrialização e no início do século XX a região começou a se desenvolver a partir da atividade industrial. Com a implantação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) no estado do Rio de Janeiro e da criação de indústrias no estado de São Paulo, a bacia se transformou num eixo de conexão entre os estados devido a características apresentadas como: suprimento de água, energia suficiente, mercado consumidor e fácil escoamento de produção, o que intensificou mais ainda a expansão da região e seu desenvolvimento industrial, resultando na construção de mais rodovias, acelerando a implantação da indústria automobilística (CEIVAP, 2015).

### **c. A importância do rio Paraíba do Sul**

O seu elevado número de habitantes e sua indústria, que gera um grande impacto na economia nacional, faz com que a bacia do rio Paraíba do Sul seja conhecida nacionalmente. Tais crescimentos que ocorreram e ainda ocorrem na região - tanto o econômico, quanto o populacional - aumentam significativamente a demanda de água da bacia (Rosa, 2012).

As águas do Rio Paraíba do Sul são usadas principalmente para: abastecimento, diluição de esgotos, irrigação, geração de energia hidroelétrica e, em menor escala, pesca, aquicultura, recreação e navegação, de acordo com o estudo realizado por Rosa (2012). A transposição para geração de energia elétrica e abastecimento retira cerca de dois terços da vazão no trecho médio do trecho paulista do rio Paraíba do Sul e quase a vazão total do rio Piraí, um de seus afluentes. A energia elétrica é gerada no Complexo Hidrelétrico de Lajes e o abastecimento atende a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, classificando, assim, a transposição para tais fins como a atividade que mais utiliza água na bacia.

### **d. Atividades Humanas e suas interferências no Rio Paraíba do Sul**

As ações humanas, de modo geral, interferem tanto na qualidade da água, quanto quantidade de água, em termos de vazão, em um rio. Por ser localizada em uma região de extrema importância para a economia brasileira – eixo de ligação entre os três principais estados do Brasil: Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo - segundo o estudo de Marengo e Alves (2004) sobre as tendências hidrológicas do rio Paraíba do Sul desde 1920, com o aumento progressivo da urbanização nessa região, a bacia do rio Paraíba do Sul apresenta aumento na demanda de suas águas. Devido às tendências decrescentes da vazão do rio em todo o seu curso ao longo dos anos e a importância da bacia para a região, ações para recuperação da bacia vêm sendo realizadas tanto pelos vários setores da

sociedade quanto pelo Governo. Tal decréscimo na vazão pode ser consequência do uso da água para abastecimento e geração de energia, devido à construção de barragens e açudes; desvio de rios para uso na agricultura, aumentando a evaporação; mudanças no uso da terra, afetando o ciclo hidrológico; mudanças no canal do rio devido à sedimentação e mudanças gradativas no regime e distribuição de chuvas na bacia. De acordo com dados utilizados no mesmo estudo, as vazões médias, em m<sup>3</sup>/s, medidas por postos fluviométricos distribuídos ao longo do rio são de: 154 em Pindamonhangaba (SP), 181 em Queluz (SP), 231 em Itatiaia (RJ), 283 em Volta Redonda (RJ), 144 em Barra do Piraí (RJ), 453 em Anta (RJ) e 627 em São Fidélis (RJ).

Com relação à vazão, atividades como mineração de areia, por exemplo, estudada na várzea do Rio Paraíba do Sul na região de Tremembé por Diniz et al. (2010), comprometem e diminuem a quantidade de água de precipitação que chega ao aquífero que compõe o rio. A perenidade do rio Paraíba do Sul, segundo Kather et al. (2009), depende da infiltração acumulada na mata ciliar. As principais atividades econômicas realizadas na várzea do rio em questão - a rizicultura e a mineração de areia - levam a grande perda de água superficial para a atmosfera, pois as alterações feitas no solo para que tais atividades aconteçam diminuem sua capacidade de infiltração para o lençol freático. Tal fenômeno é também observado no estudo realizado por Alvarenga et al. (2012) na microbacia do Ribeirão dos Macacos, afluente do rio Paraíba do Sul, que conclui que ações de recuperação ambiental melhoram a qualidade da água em termos de pH, oxigênio dissolvido e condutividade da água, bem como ajudam na manutenção da vazão do rio durante o ano todo, pois há maior retenção de água pela bacia em períodos chuvosos.

Com relação à qualidade da água, segundo estudo feito por Kury (2008) na região de Campos dos Goytacazes (RJ), destacou-se, ao longo de todo o rio, a contaminação realizada pelo despejo de efluentes agrícolas, esgotos domésticos e resíduos industriais. Apesar de no trecho paulista a quantidade de carga orgânica no rio Paraíba do Sul provenientes do esgoto doméstico estar dentro dos padrões exigidos pelas legislações Estadual e Federal, segundo Rosseti (2009), considerou-se preocupante o fato das condições de tratamento de esgoto nos 34 municípios que compõem a bacia não terem sido alteradas entre os anos de 1998

e 2007, visto que as cidades continuam em expansão. De acordo com o estudo realizado por Rosa (2012), a região do Médio Paraíba – SP apresentou os menores índices de oxigênio dissolvido (OD) e os maiores de demanda química de oxigênio (DQO) até o ano de 2010. Tais resultados se devem tanto às características físicas desse trecho - sinuoso e localizado em uma planície, reduzindo o gradiente de velocidade e, conseqüentemente, não favorecendo a oxigenação e depuração da matéria orgânica - quanto a elevada concentração populacional associada ao despejo de esgoto sem tratamento, com destaque às cidades de Jacareí, São José dos Campos e Guaratinguetá, que até 2010 tratavam apenas 20%, 46% e 18% de seu volume de esgoto coletado, respectivamente. Apesar da melhoria significativa nos sistemas de tratamento de esgoto das cidades de Jacareí e São José dos Campos no ano de 2011, a melhoria na qualidade das águas do rio nesse trecho e o comprovado reaparecimento de peixes na região, segundo o mesmo estudo, essa melhora é pontual e a qualidade da água do rio apenas se manterá nos trechos a jusante dessas estações de tratamento se os sistemas de coleta e tratamento de esgoto forem inadequados. Há também a preocupação com efluentes industriais e agrícolas despejados ao longo do trecho paulista. Esse tipo de despejo pode comprometer a qualidade da água do rio e, conseqüentemente, a água que chega à represa do Funil, na cidade de Queluz (SP), poluindo-a e inviabilizando seu uso para o abastecimento público, uma vez que a água represada abastece a cidade do Rio de Janeiro através de um desvio feito no Rio Paraíba do Sul.

#### **e. A relação entre a qualidade da água do Rio Paraíba do Sul e o crescimento de plantas aquáticas**

Como visto anteriormente, a contaminação proveniente do despejo de efluentes agrícolas, esgotos domésticos e resíduos industriais influenciam significativamente na qualidade da água do Rio Paraíba do Sul. A decomposição direta desse material gera como consequência o aumento significativo da concentração de compostos orgânicos e inorgânicos ao longo do Rio (ROSA,

2012). Segundo Rossetti (2009), o tratamento realizado para realizar o despejo desses efluentes no corpo de água não foca em retirar os nutrientes presentes (Nitrogênio e Fósforo), causando um excesso desses mesmos nutrientes no rio, caracterizando o processo de eutrofização. Esse processo tem como consequência o crescimento excessivo de organismos que incorporam esses nutrientes, entre eles as plantas aquáticas. Dentre as plantas aquáticas, destacam-se as macrófitas aquáticas que são a vegetação em forma macroscópica (LEANDRO, 2014).

As macrófitas em ambientes com baixa ação antrópica geram benefícios como retirar excesso de substâncias tóxicas do corpo d'água, abrigo para proteção de organismos aquáticos, favorece a biodiversidade biológica e contribui para que não ocorra o processo de erosão protegendo as margens dos rios. De acordo com um estudo feito por Boschilia et al (2014), a macrófita da espécie *Salvinia Herzogii* de La Sota absorve cerca de 0,0002 kg de nitrogênio amoniacal por m<sup>2</sup> por dia. Entretanto, no rio Paraíba do Sul, com a alta ação antrópica, que tem como consequência o excesso de lançamento de nutrientes no rio, que combinado a uma série de fatores físicos e biológicos, gera um crescimento excessivo das ilhas de macrófitas ao longo do rio (AGEVAP, 2007).

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivos Gerais**

Realizar simulações numéricas de escoamento em rios, com especial destaque para o Rio Paraíba do Sul, buscando conhecer o comportamento destes escoamentos a partir de diferentes geometrias e também da existência de afluentes, além de simular o despejo de um poluente no curso principal do rio afim de entender a forma como ele se dispersa e um possível processo de absorção desse poluente pelo corpo d'água.

### **4.2 Objetivos Específicos**

Este trabalho tem como principais objetivos específicos as seguintes etapas:

- realizar uma pesquisa bibliográfica buscando conhecer as diferentes características do Rio Paraíba do Sul. Primeiramente no que diz respeito a sua geometria (por exemplo, trechos com características retangulares (Figura 1), curvas, existência de um ou mais afluentes que possam ou não influenciar nas características do escoamento) e posteriormente sobre a qualidade da água do rio, aspectos biológicos e características de poluentes que podem existir ou ser despejados no curso do rio buscando definir parâmetros que serão inseridos no estudo;
- após determinarmos a geometria de escoamento, quantidade de afluentes e dados iniciais (pressão e perfis de velocidade), serão realizadas simulações numéricas através do software COMSOL, cuja licença foi

adquirida via Projeto Fapesp 2014/06679-8 através do orientador deste projeto;

- em seguida, com os resultados numéricos coletados, será feita uma análise detalhada de em que circunstâncias a influência da geometria e/ou da existência de afluentes influenciam significativamente no escoamento no Rio Paraíba do Sul;
- feito isso, utilizaremos o modelo de escoamento como base para simular a dispersão de nutrientes que caracterizam a poluição e também sua incorporação por plantas aquáticas.

## 5. Metodologia

### 5.1 Equação Modelo

Introduz-se aqui um estudo numérico da equação diferencial parcial que modela o fenômeno de escoamento em duas direções, também conhecido como equações de Navier-Stokes (Arpaci, 1966; Bejan, 1996), descritas como,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + X \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + Y \quad (3)$$

no qual a equação (1) é conhecida como a equação da conservação da massa, as equações (2) e (3) são conhecidas, respectivamente, como as equações do movimento nas direções  $x$  e  $y$ ,  $\rho$  é a massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica ( $\text{kg/m.s}$ ),  $u$  e  $v$  são as componentes da velocidade ( $\text{m/s}$ ) nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente,  $p$  é a pressão ( $\text{N/m}^2$ ) e por fim  $X$  e  $Y$  são as forças de campo nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente.

Além das equações (1), (2) e (3), será utilizada a equação de conservação da concentração a seguir:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \right) + \dot{N}_A \quad (4)$$

na qual  $C_A$  é a concentração (de um poluente, por exemplo) e  $D_{AB}$  é o coeficiente de difusão binária (que representa a capacidade da espécie A de se difundir na espécie B em  $\text{m}^2/\text{s}$ ).



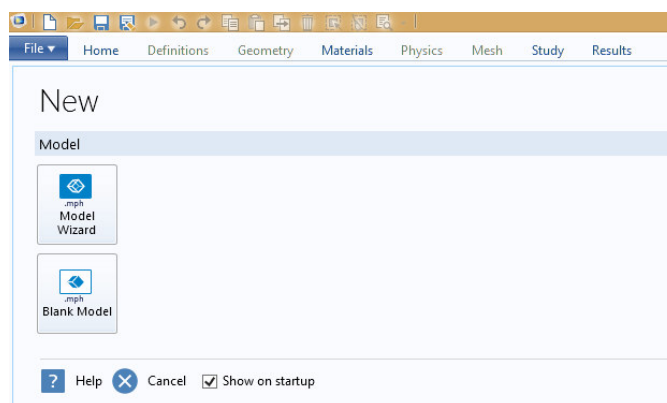
## 5.2 Software COMSOL

Através do Projeto Fapesp Processo 2014/06679-8, o orientador deste projeto possui a licença do pacote Multiphysics do COMSOL e de vários módulos, entre eles o de CFD (Computational Fluid Dynamics). Com isso, será possível definir uma geometria na qual serão realizadas várias situações de entrada de afluentes no trecho do rio escolhido.

Para iniciar o estudo de caso, deve-se criar um modelo de escoamento no programa e a partir dele realizar as simulações. O modelo que se aproxima mais de um escoamento em um rio é construído de acordo com as seguintes etapas realizadas a partir do momento em que o software foi iniciado no computador:

- **Etapa 1:** Ao iniciar o software, aparecerão duas opções de modelo das quais uma será selecionada para a criação de um novo modelo, de acordo com a Figura 3. Dentre elas, deve-se selecionar a opção “*Model Wizard*”, que permitirá a criação de um novo modelo em poucos passos;

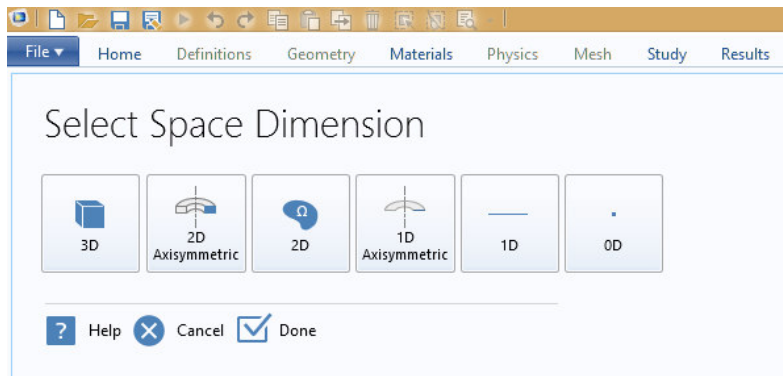
**Figura 3.** Característica da tela do computador ao abrir o software COMSOL.



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

- **Etapa 2:** Ao selecionar a opção “*Model Wizard*”, será dado início à construção do modelo. Primeiramente, devemos escolher o número de dimensões com o qual se trabalhará e se analisará o escoamento. As opções aparecerão conforme a Figura 4. A princípio, trabalhar-se-á com o escoamento em duas dimensões, portanto selecionou-se a opção “2D”;

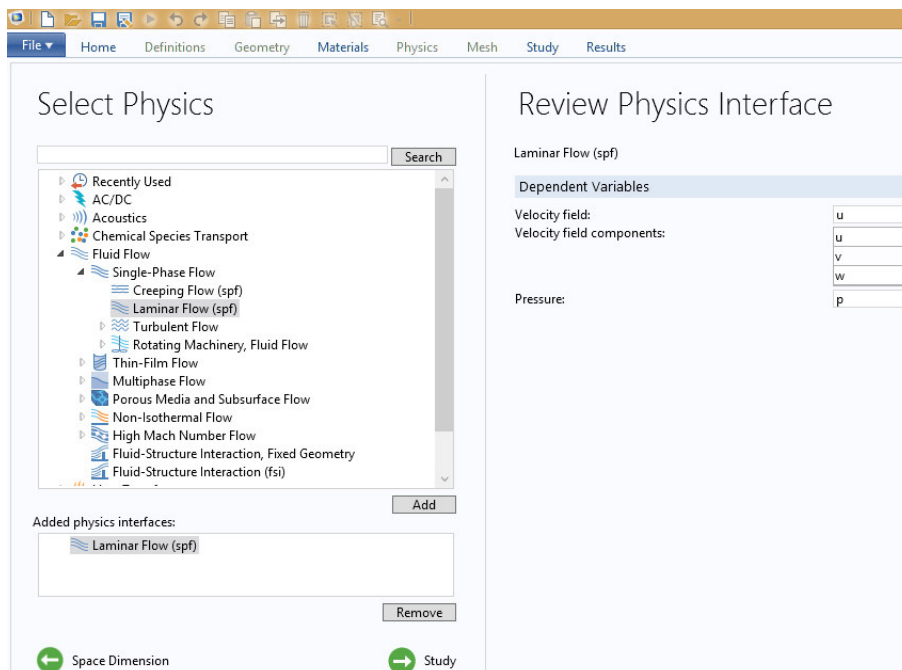
**Figura 4.** Opções de dimensão para o modelo.



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

- **Etapa 3:** Escolhida a dimensão na qual será realizado o estudo, seleciona-se qual fenômeno físico será estudado, e o mesmo deve ser adicionado às interfaces físicas. Nesse trabalho, o estudo do escoamento de um fluido será feito considerando um escoamento laminar (*Fluid Flow > Single-Phase Flow > Laminar Flow*);

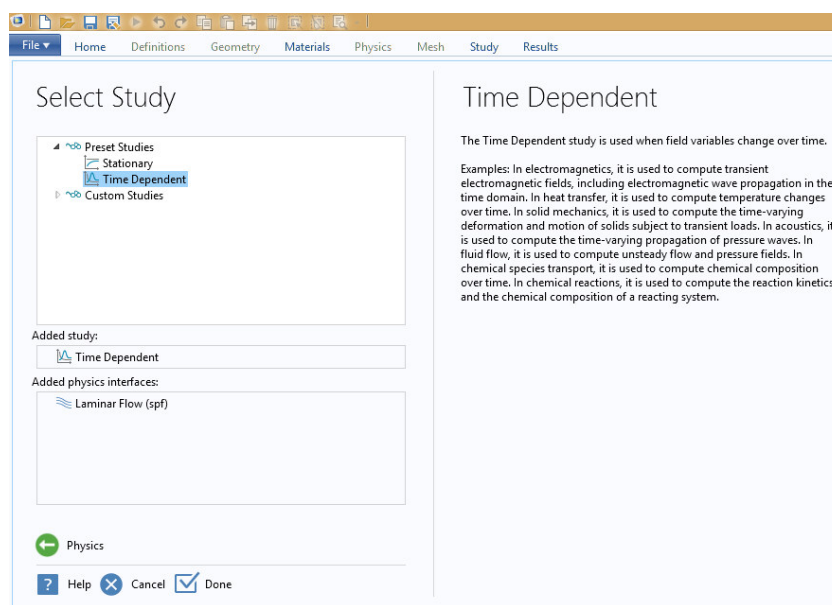
**Figura 5.** Tipos de fenômenos físicos simulados no COMSOL.



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

- **Etapa 4:** Escolhido o fenômeno físico a ser estudado, seleciona-se o tipo de estudo. No caso desse trabalho, o estudo será com um problema bidimensional transiente, portanto selecionou-se a opção de estudo “*Time Dependent*” (Figura 6);

**Figura 6.** Tipos de estudos disponíveis no COMSOL



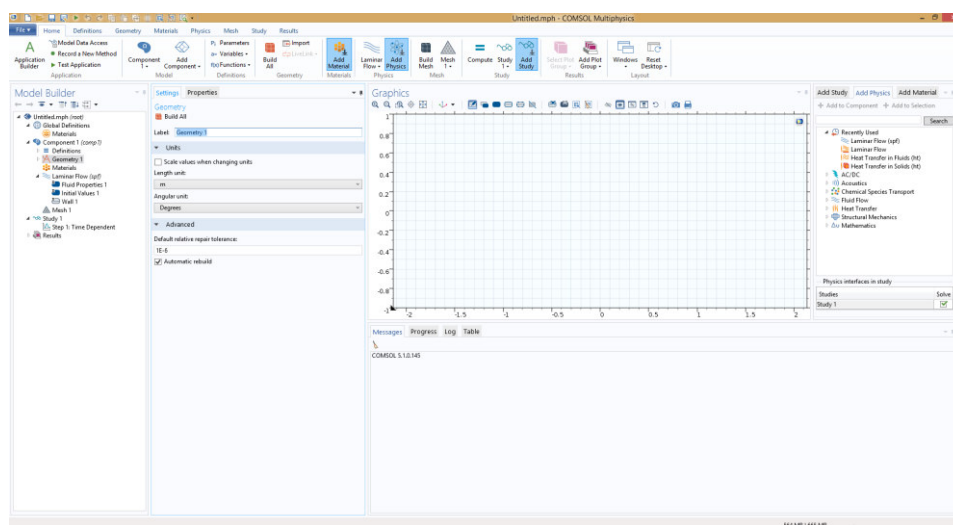
Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

Feitas essas quatro primeiras etapas, o software apresentará o layout conforme a Figura 7.

A partir desse ponto, consegue-se definir a geometria do rio e de seus afluentes (*Geometry*), definir o material do fluido que está escoando (*Materials*), a geometria e o tamanho da malha que compõe o domínio (*Mesh*) e as condições de contorno utilizadas no problema (*Physics*). Todos os itens mencionados são encontrados nessa mesma ordem na barra de ferramentas do programa. A seguir, estão descritos, respectivamente, como cada um desses itens foram definidos para o presente estudo.

Visando construir um modelo que mais se aproxima a realidade de um rio e do trecho estudado, tomando como base uma imagem espacial extraída do Google Earth, o Dr. Jairo Aparecido Martins construiu o contorno aproximado desse trecho no formato .dxf utilizando o programa AutoCAD. A imagem gerada

**Figura 7.** Aparência do COMSOL após definidas algumas características básicas do modelo



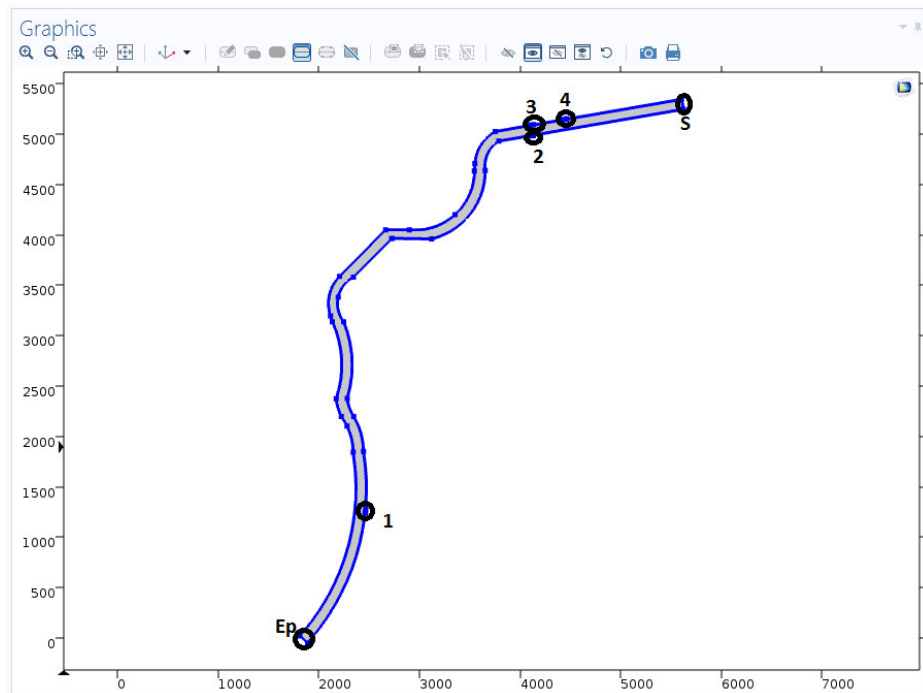
Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

foi posteriormente importada para o COMSOL e utilizada como o domínio do problema. O trecho possui cerca de 6 quilômetros, o escoamento se inicia na entrada do curso principal (Ep), termina na saída S e possui quatro afluentes enumerados no sentido do escoamento do rio (1, 2, 3 e 4) como mostra a Figura 8. Com o contorno do domínio pronto, definiu-se o fluido que escoará nos ensaios: neste caso, o material será a água pura. A malha que compõe o domínio é construída automaticamente pelo programa, entretanto, é necessário definir o tipo da malha e suas dimensões. Para que o programa construa uma malha mais refinada para que a simulação tenha o menor erro possível, foi escolhida a malha triangular, considerando 5 metros o tamanho do maior elemento – que é um tamanho pequeno comparado à extensão total do domínio (6 km). Na Figura 9, pode-se observar uma parte ampliada do domínio com a malha já construída; com relação às condições de contorno, consideraram-se todas as bordas do domínio, exceto as que representam a entrada do escoamento do rio, as entradas de seus afluentes e a saída, como paredes nas quais a velocidade de escoamento é zero.

Para facilitar o monitoramento da velocidade do escoamento e da influência das entradas que representam os afluentes, foram criados seis pontos dentro do domínio (A, B, C, D, E e F) – pontos estratégicos localizados no centro de onde

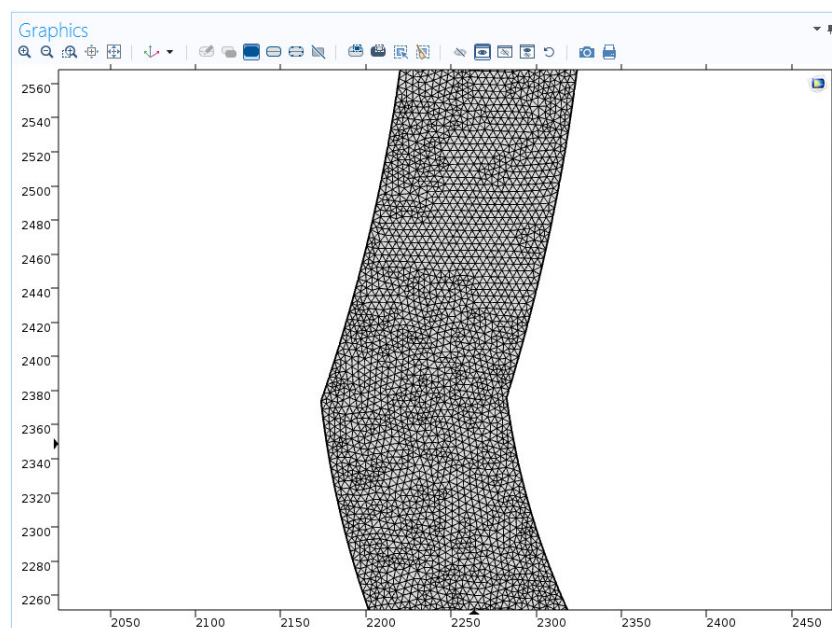
seria o curso do rio, antes e depois dos afluentes considerados – como mostram as Figuras 10 e 11.

**Figura 8.** Domínio importado para o COMSOL com os afluentes sinalizados e enumerados.



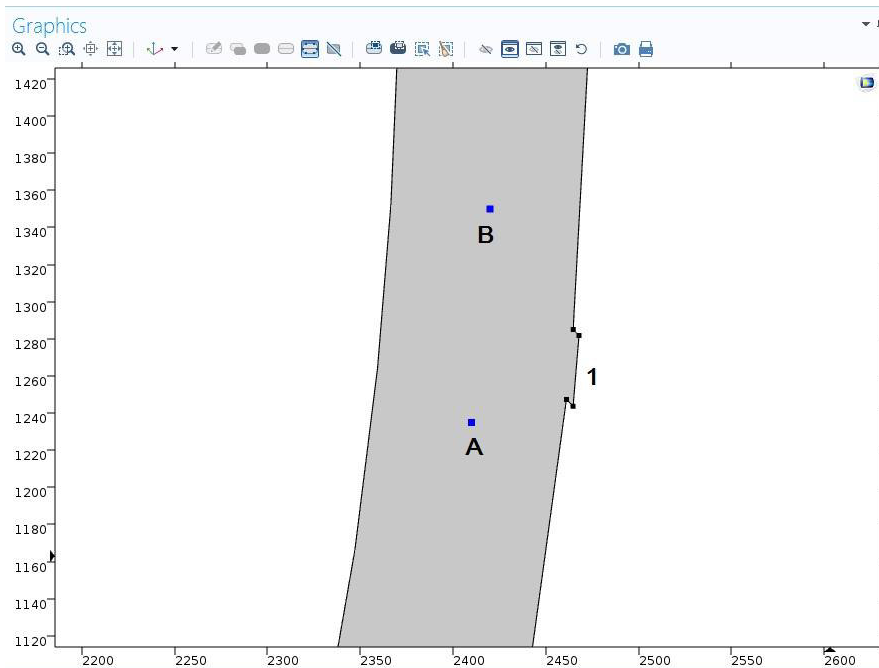
Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

**Figura 9.** Imagem ampliada de parte da malha que constitui domínio.



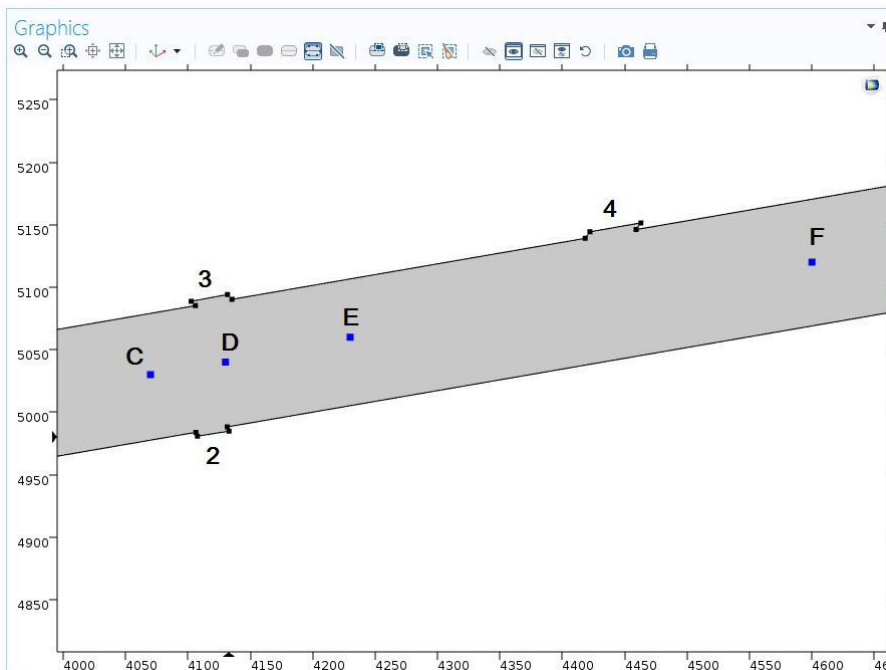
Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

**Figura 10.** Pontos inseridos para monitoramento da velocidade do escoamento no trecho próximo ao afluente 1.



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

**Figura 11.** Pontos inseridos para monitoramento da velocidade do escoamento no trecho próximo aos afluentes 2, 3 e 4.



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

## 6. Aplicação Numérica

### 6.1 Estudo do escoamento

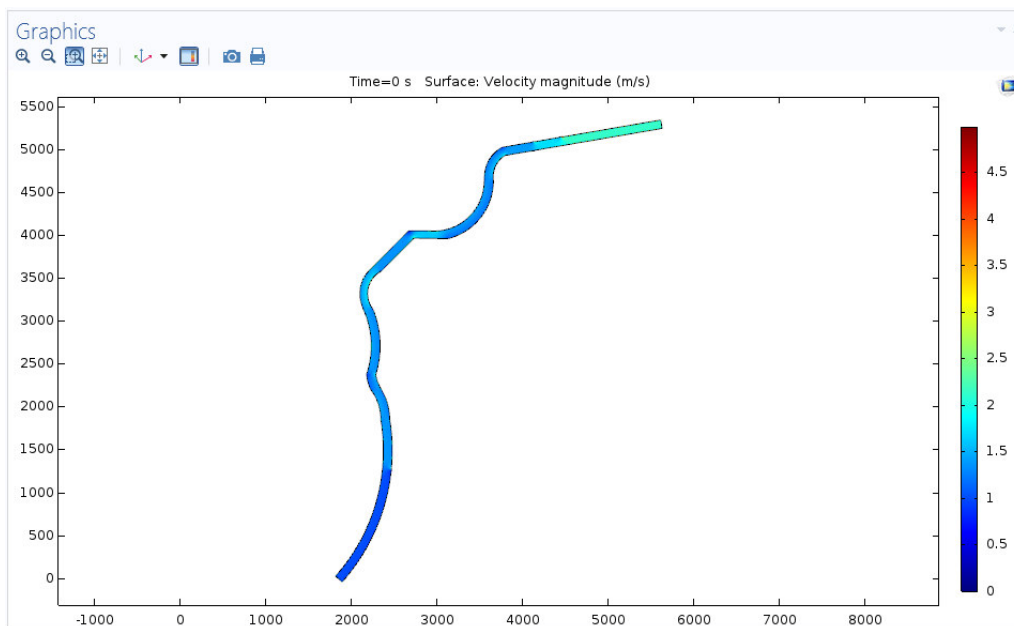
Para iniciarmos as simulações do escoamento, considerou-se a velocidade inicial na entrada do curso principal do rio ( $E_p$ ) constante e com o valor de 1 m/s, próximo à velocidade média real do rio. As velocidades dos afluentes serão denominadas  $V_a$  e  $V_b$ . Os afluentes maiores, denominados 1, 3 e 4, possuirão velocidades iguais ( $V_a$ ) durante as simulações e o afluente 2, por ser menor, possuirá uma velocidade menor ( $V_b$ ), sempre seguindo a seguinte proporção:

$$V_b = 0,2V_a.$$

As simulações foram realizadas em um tempo total de 8000 segundos, com passos de 1 segundo no tempo. A partir do software é possível criar perfis de velocidades para cada instante do escoamento que mostram através das cores em que regiões do domínio a velocidade é mais próxima de zero (azul) e em quais regiões a velocidade é máxima (vermelho). Nas Figuras 12 e 13, pode-se observar o perfil de velocidade no instante  $t = 0$  s e  $t = 8000$  s para  $V_a = 2$  m/s e  $V_b = 0,4$  m/s.

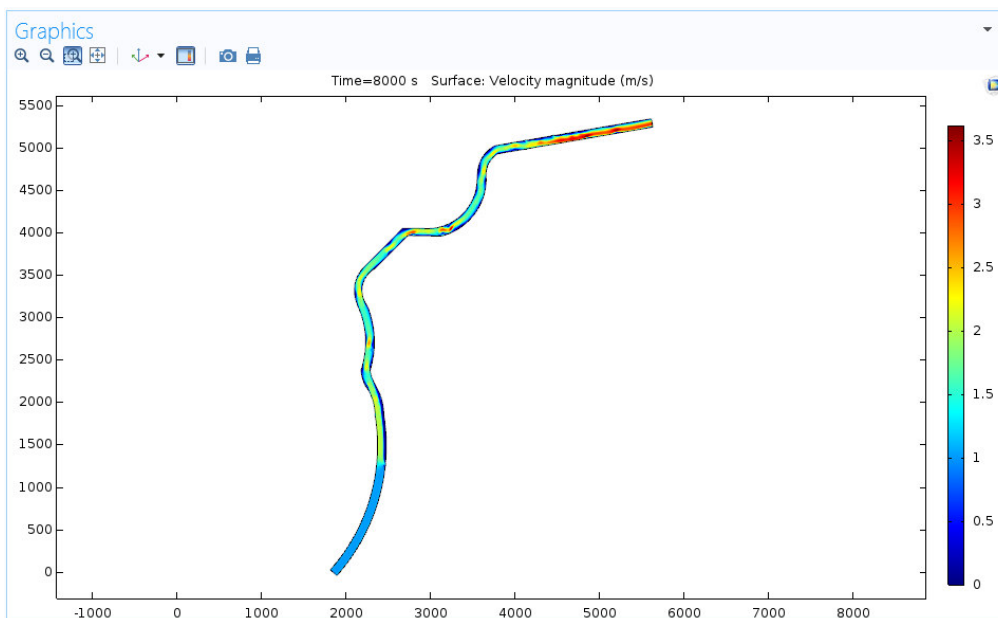
Com os perfis de cada simulação, as velocidades nos pontos A, B, C, D, E e F foram anotadas nos tempos de 2000, 4000, 6000 e 8000 segundos. A partir desses dados, foram construídos os quatro gráficos a seguir que mostram a variação da velocidade no curso do rio ( $V$ ) nos pontos de monitoramento de acordo com a velocidade dos afluentes ( $V_a$ ) nos instantes  $t = 2000$  s e  $t = 8000$  s, que teoricamente representam no domínio, respectivamente, o instante em que o escoamento está se desenvolvendo e o instante em que o regime já está completamente desenvolvido. Para melhor visualização da influência dos afluentes, os gráficos que ilustram as velocidades nos pontos A e B foram plotados nos mesmos planos, separados dos que ilustram as velocidades nos pontos C, D, E e F que também foram plotados nos mesmos planos, pois se tratam de regiões relativamente distantes dentro do domínio.

**Figura 12.** Perfil de velocidade no instante  $t = 0$  s ( $V_a = 2$  m/s e  $V_b = 0,4$  m/s).



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

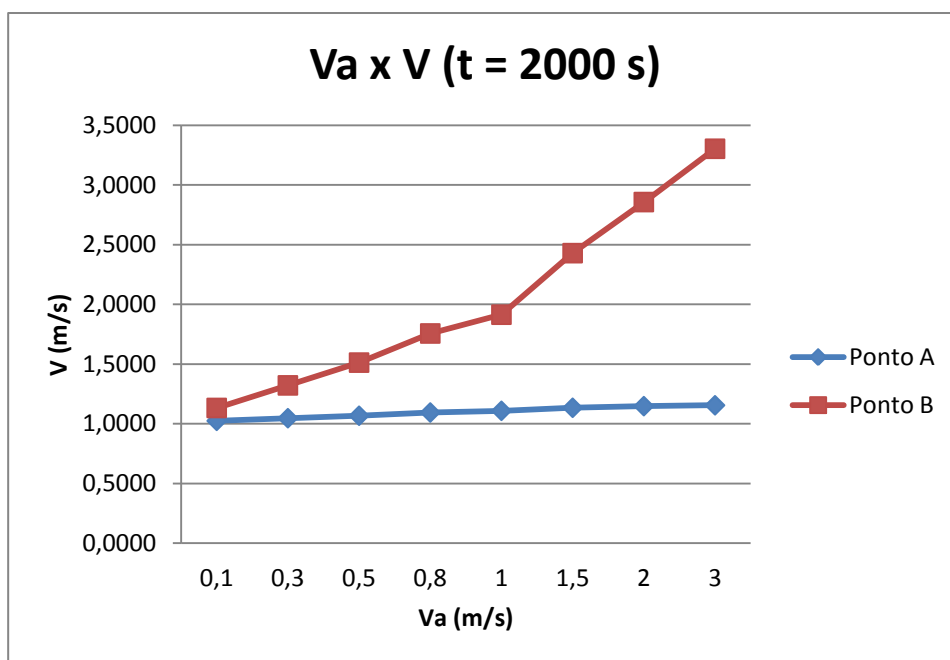
**Figura 13.** Perfil de velocidade no instante  $t = 8000$  s ( $V_a = 2$  m/s e  $V_b = 0,4$  m/s).



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

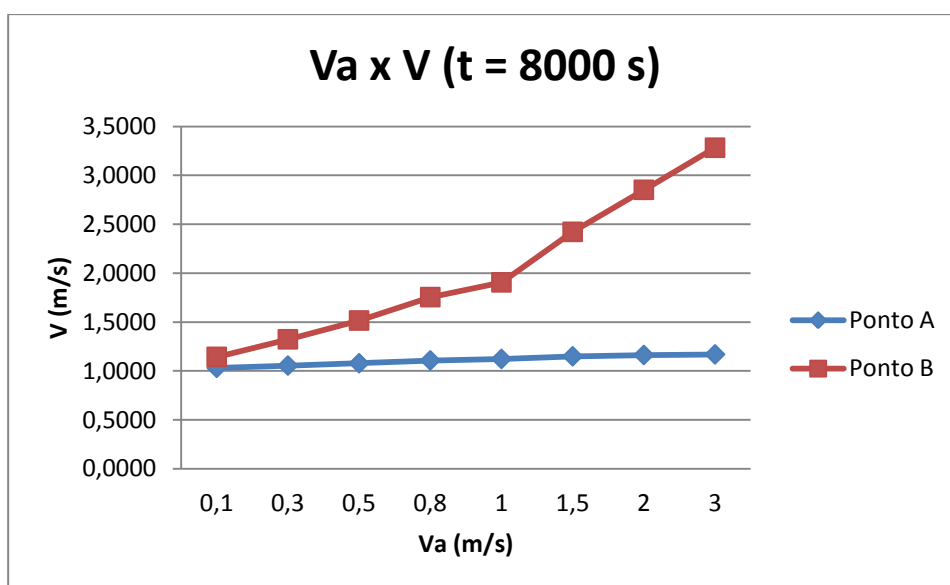


**Figura 14** .Gráfico da variação de V nos pontos A e B em função de Va no instante t = 2000 s.



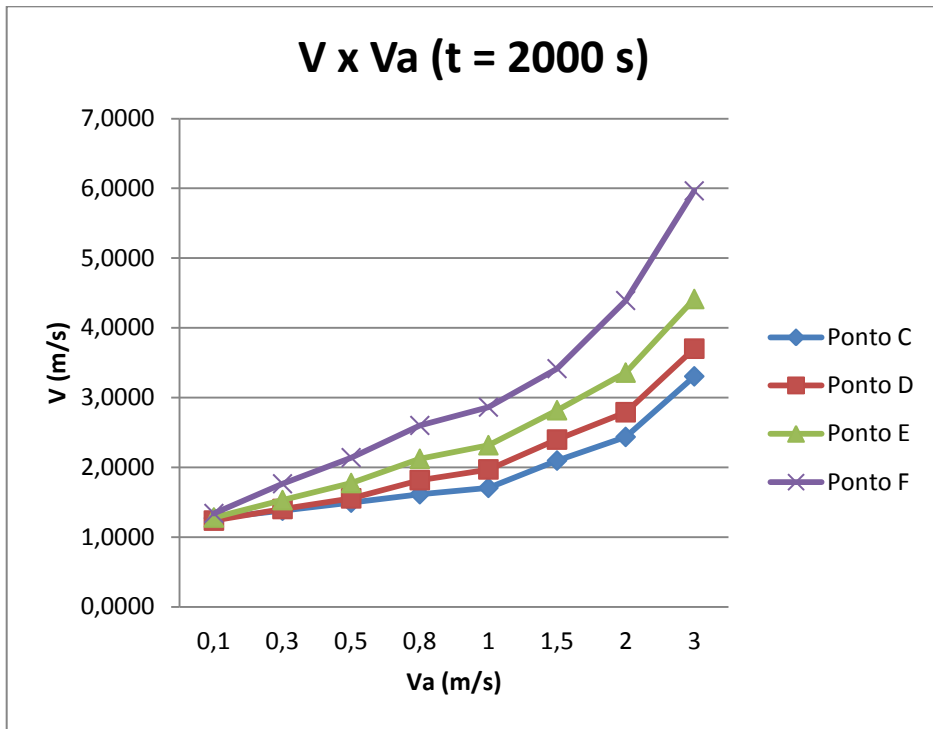
Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

**Figura 15**. Gráfico da variação de V nos pontos A e B em função de Va no instante t = 8000 s.



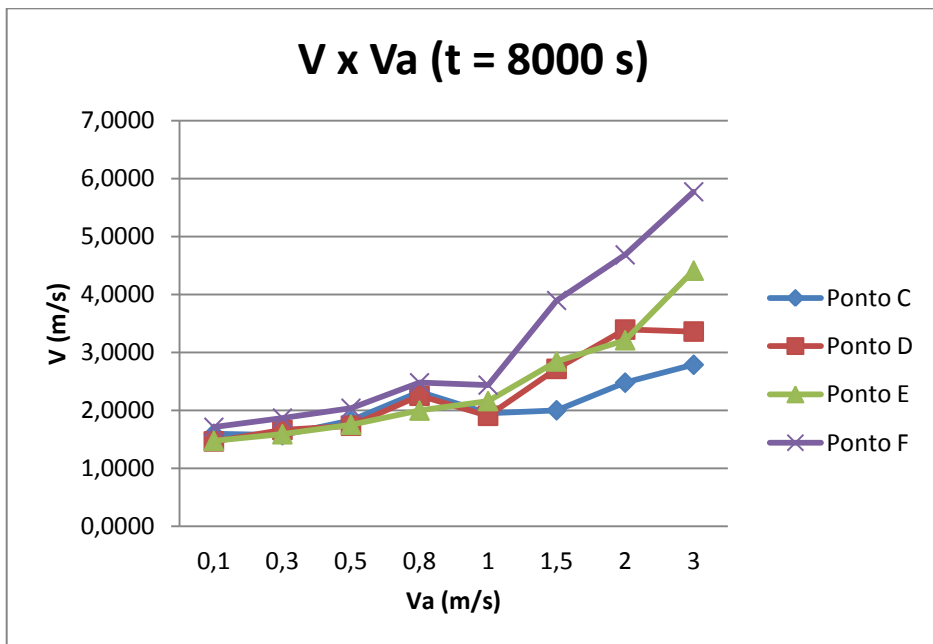
Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

**Figura 16.** Gráfico da variação de V nos pontos C, D, E e F em função de Va no instante t = 2000 s.



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

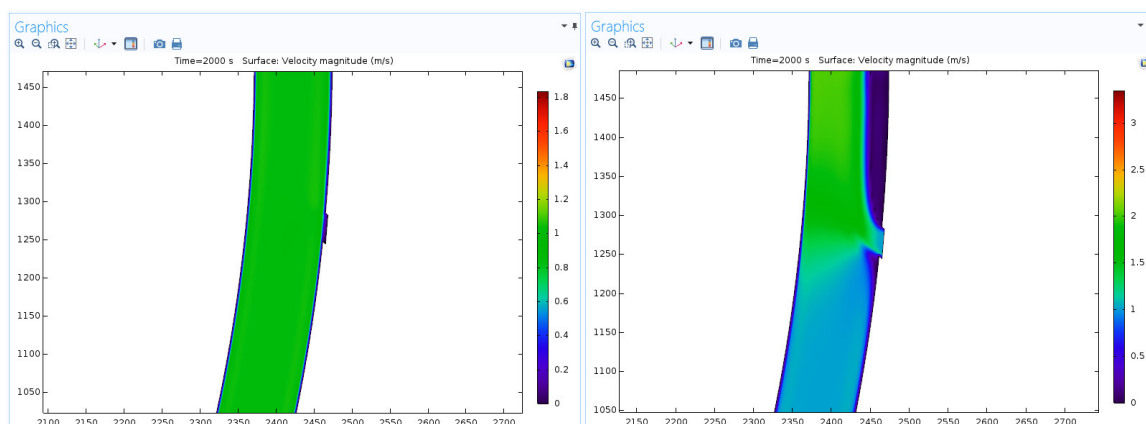
**Figura 17.** Gráfico da variação de V nos pontos C, D, E e F em função de Va no instante t = 8000 s.



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

Feitas as comparações das velocidades nos pontos de monitoramento, considerando a existência dos afluentes, realizou-se um novo ensaio, buscando enfatizar a influência dos afluentes no curso principal, no qual se desconsidera a entrada dos afluentes, ou seja,  $V_a = V_b = 0$ . Para analisarmos melhor os resultados, foram feitas comparações entre as imagens dos perfis de velocidade nas regiões dos pontos A e B e C, D, E e F para  $V_a = V_b = 0$  com as imagens dos perfis de velocidade nas regiões dos mesmos pontos quando  $V_a = 2$  e  $V_b = 0,4$ . Tais comparações podem ser observadas nas figuras 18 e 19, na qual a imagem à esquerda representa o perfil para  $V_a = V_b = 0$  e a imagem à direita representa o perfil para  $V_a = 2$  m/s e  $V_b = 0,4$  m/s.

**Figura 18.** Comparação entre os perfis para  $V_a = V_b = 0$  (à esquerda) e  $V_a = 2$  m/s e  $V_b = 0,4$  m/s (à direita) nas regiões dos pontos A e B.

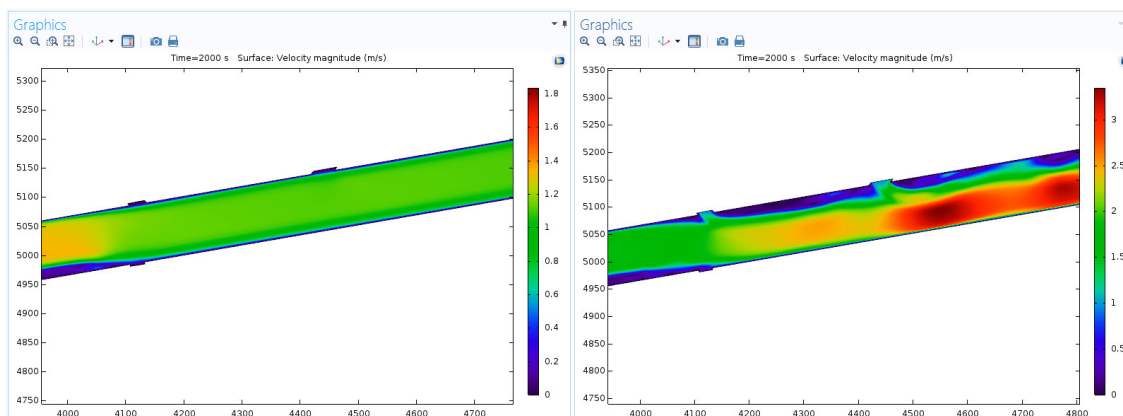


Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

Analisando os gráficos e as imagens dos perfis de velocidade, pode-se afirmar que os afluentes interferem na velocidade do curso principal do rio, e à medida que suas respectivas velocidades aumentam, a velocidade do rio também aumenta. Observamos também que os gráficos das figuras 14 e 15 que comparam as velocidades nos pontos A e B no instante 2000 s e no instante 8000 s são praticamente iguais. Com isso, pode-se concluir que no instante 2000 s o escoamento nesse trecho já atingiu o regime permanente, ou seja, a partir desse instante, com as velocidades constantes, o escoamento não mudará sua forma. O mesmo já não pode ser observado nos gráficos das figuras 16 e 17 que comparam as velocidades nos pontos C, D, E e F nos instantes 2000 s e 8000 s.

No gráfico da figura 16, construído com valores obtidos no instante 2000 s, observa-se que as velocidades nos pontos crescem de acordo com o crescimento da velocidade nos afluentes, já no gráfico da figura 17, construído com valores obtidos no instante 8000 s, não observa-se essa relação: à medida que a velocidade nos afluentes aumenta, em alguns pontos no curso do rio a velocidade aumenta, e em outros diminui, caracterizando certa turbulência. A partir dessa observação, podemos afirmar que no instante 8000 s, na região dos pontos C, D, E e F, o escoamento ainda não atingiu o regime permanente.

**Figura 19.** Comparação entre os perfis para  $V_a = V_b = 0$  (à esquerda) e  $V_a = 2$  m/s e  $V_b = 0,4$  m/s (à direita) nas regiões dos pontos C, D, E e F.



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

## 6.2 Estudo da dispersão e absorção de nutrientes

Para simularmos a dispersão e absorção de nutrientes, continuar-se-á com a mesma configuração usada no estudo do escoamento (*Laminar flow*) apenas adicionando o módulo *Transport of Diluted Species* que simula a dispersão e absorção de espécies químicas. Como no estudo anterior, para facilitar as análises dos resultados obtidos, fixou-se os pontos A, B, C, D E e F, atribuiu-se valores para as velocidades do rio e dos afluentes, e analisou-se os valores da concentração da espécie química escolhida.

Para as velocidades do curso principal, considerou-se um período de seca no qual a velocidade do rio Paraíba do Sul está mais baixa. A velocidade fixada para o curso principal do rio (Ep) foi de 0,7 m/s, considerando uma vazão de 160 m<sup>3</sup>/s – valor aproximado da vazão estabelecido, uma vez que o trecho estudado está entre as cidades de Pindamonhangaba e Queluz, que, de acordo com Marengo e Alves (2005), possuem vazões médias de 154 m<sup>3</sup>/s e 180 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. As velocidade nos afluentes 2, 3 e 4 será fixada em 0,12 m/s e a velocidade no afluente 1 (V1) sofrerá quatro variações de velocidade a partir da vazão de 1,73 m<sup>3</sup>/s (ROSSETTI, 2009), de 0,3 m/s, 0,6 m/s, 0,7 m/s e 0,9 m/s.

No módulo *Transport of Diluted Species*, é necessário definir o coeficiente de difusão binária da espécie química estudada em m<sup>2</sup>/s. Esse valor representa a facilidade com que um soluto tem em se mover em um solvente. Entre os possíveis valores de coeficiente encontrados na literatura, escolheu-se o valor do nitrogênio amoniacal para realizar o estudo pois essa substância, além de indicar a presença de esgoto doméstico no corpo d'água e que o foco de poluição está recente, é assimilada por plantas aquáticas que ajudam no processo de despoluição do rio (VON SPERLING, 1996). Portanto, o valor definido para o coeficiente de difusão binária do nitrogênio amoniacal foi de  $1,96 \times 10^{-9}$  (m<sup>2</sup>/s) (CREMASCO, 2002).

Além da velocidade e do coeficiente de difusão, é necessário que se defina qual ou quais entradas serão a fonte de poluição, qual será a concentração de entrada do nitrogênio amoniacal e qual será a concentração de nitrogênio já presente no curso principal do rio. Iremos considerar como fonte poluidora o afluente 1, pois é o que apresenta maior concentração de esgoto sanitário, uma vez que esse ribeirão atravessa a cidade de Lorena - SP e apresenta despejo de esgoto doméstico em diversos pontos ao longo de todo seu percurso (OLIVEIRA, 2017). Para definir um valor para a concentração inicial de nitrogênio amoniacal no afluente 1, utilizou-se o estudo realizado por Oliveira et al. (2017) que classificou de acordo com Metcalf & Eddy (1991) o esgoto como "forte", "médio" e "fraco" e a concentração para cada uma dessas classificações é de 50, 25 e 12 mg/L, respectivamente. O valor do esgoto classificado como médio foi escolhido para realizar o estudo. Entretanto, o valor da concentração solicitado pelo COMSOL está na unidade de mol/m<sup>3</sup>. Para fazer a conversão, utilizou-se o valor

da massa molar do nitrogênio amoniacal (18 g/mol) e a partir de regra de três simples, calculou-se que a concentração na entrada do afluente 1 é de 1,389 mol/m<sup>3</sup> nas condições estipuladas. Para aproximar o problema da realidade, a entrada desse poluente no afluente 1 não será constante. Definiu-se que a concentração de entrada do nitrogênio amoniacal será regida pela seguinte equação:

$$C_e = 1,389 e^{-t} \quad (5)$$

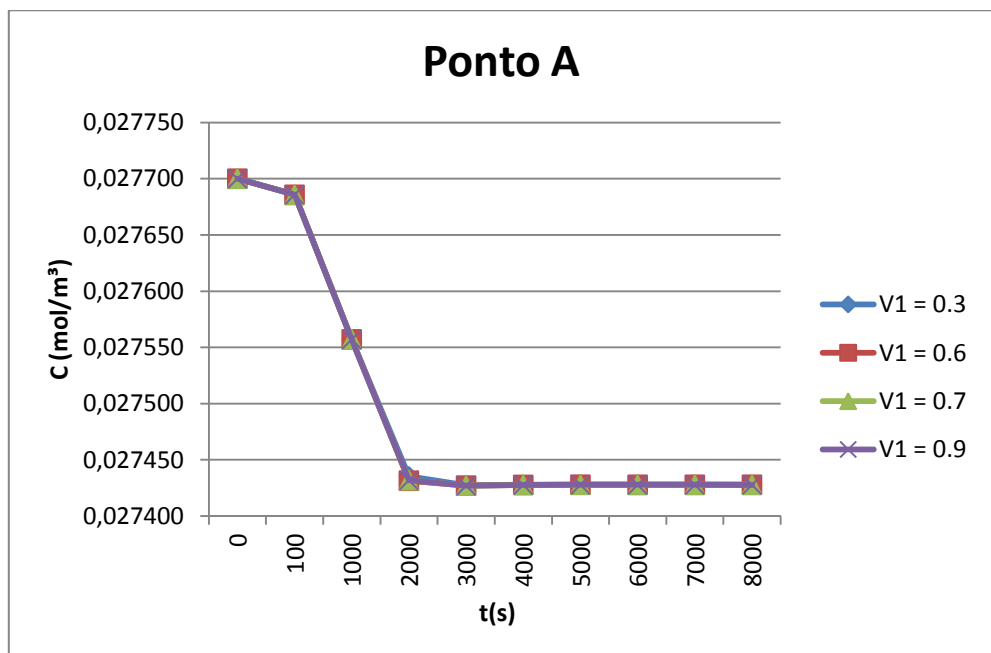
na qual  $C_e$  é a concentração em mol/m<sup>3</sup> de entrada no afluente 1 e  $t$  é o tempo em s. Definiu-se também um valor para a concentração do nitrogênio amoniacal já presente no curso do rio, considerou-se o valor de 0,0277 mol/m<sup>3</sup> obtido por regra de três simples a partir do valor de 0,05 ml/L de nitrogênio amoniacal encontrado em análises no ponto de monitoramento próximo a região estudada (CETESB, 2018), vale ressaltar que o valor máximo de nitrogênio amoniacal para um rio de classe 2 como o rio Paraíba é de 3,2 ml/L.

Feitos os ajustes, considerou-se que a absorção do nitrogênio amoniacal ao longo de todo o trecho do rio estudado seria realizada por plantas aquáticas distribuídas pelo curso do rio. Como definir no domínio a geometria que cada ilha de macrófita tem e as posições onde elas se encontram seria um processo trabalhoso, optou-se por considerar que a absorção acontece por todo domínio do rio e que é proporcional a porcentagem de cobertura das ilhas de macrófitas. Considerando que uma ilha de macrófita absorve 0,0002 kg de nitrogênio amoniacal por m<sup>2</sup> por dia, ou seja 0,00166 kg/m<sup>3</sup>.dia, considerando a profundidade de 0,12 m do recipiente utilizado para o estudo de Boschilia (2014), e que o COMSOL requer essa absorção em mol/m<sup>3</sup>.s, a absorção de nitrogênio em uma ilha será de  $7,177 \times 10^{-7}$  mol/m<sup>3</sup>.s obtida a partir de regra de três simples, uma vez que a massa molar do nitrogênio amoniacal é de 0,018 kg/mol e um dia possui 86400 s. Para realizar as simulações, considerou-se coberturas de macrófitas que ocupam 20% da área total do rio, portanto a absorção considerada para todo domínio do rio foi de  $2,153 \times 10^{-7}$  mol/m<sup>3</sup>s.

Como no estudo anterior, as simulações foram realizadas em um tempo total de 8000 segundos, com passos de 1 segundo no tempo. As concentrações

nos pontos A, B, C, D, E e F foram anotadas nos tempos de 0, 100, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000 e 8000 segundos. A partir desses dados, foram construídos os seis gráficos a seguir que mostram a variação da concentração (C) em mol/m<sup>3</sup> ao longo do tempo em cada ponto de monitoramento. Para melhor visualização de como a velocidade de entrada do afluente influencia na concentração nos pontos de monitoramento, plotou-se no mesmo plano as concentrações para cada variação de velocidade no afluente 1 (V1), que despeja o poluente.

**Figura 20.** Gráfico da variação de C no ponto A ao longo do tempo t para cada valor de V1.

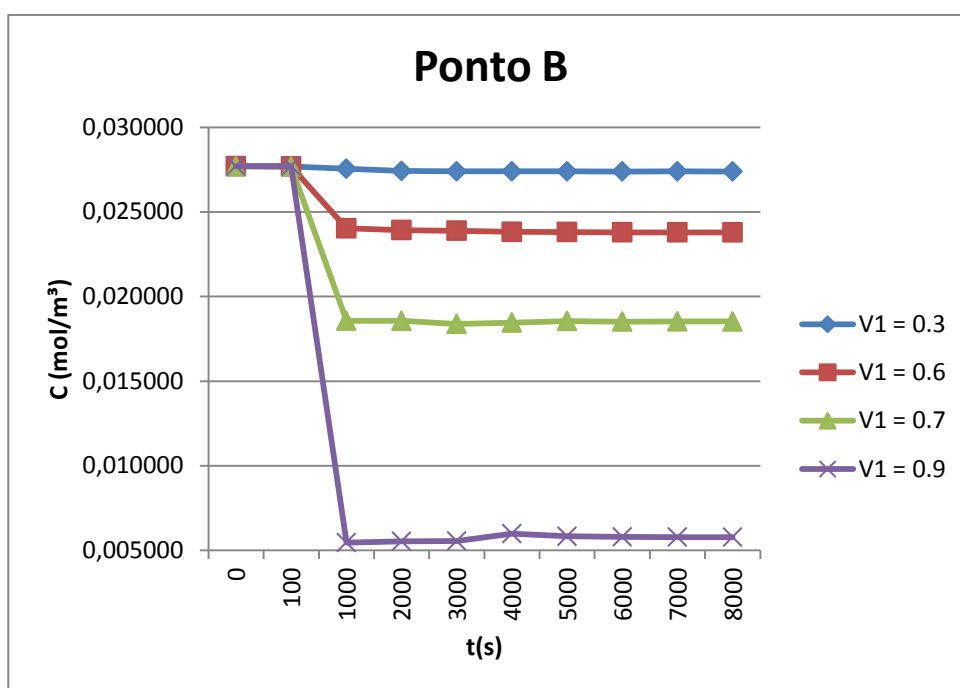


Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

Analisando os gráficos, nota-se na Figura 20 que no ponto A a concentração decresce até  $t = 2000$  s e depois se torna constante. Pode-se afirmar que tal decrescimento na concentração se dá por conta da absorção do nitrogênio amoniacal considerada no início do estudo, no valor de  $2,153 \times 10^{-7}$  mol/m<sup>3</sup>s, até que entre 2000 s e 3000 s o trecho entra em regime permanente e atinge um “equilíbrio” entre a quantidade de nitrogênio amoniacal que o rio é capaz de absorver nesse ponto e a quantidade de nitrogênio amoniacal proveniente da entrada  $E_p$  que chega nesse ponto.

Com relação à concentração de nitrogênio amoniacal no domínio a partir do ponto B (Figura 21), para todas as variações de velocidade, quanto mais o tempo  $t$  aumenta, menor é a quantidade de nitrogênio amoniacal que está sendo despejada no rio, de acordo com a Equação (6). Com isso, à medida que o tempo  $t$  aumenta, o afluente 1 deixa de ser poluidor e passa a ser uma entrada que despeja água com uma concentração de poluente cada vez menor do que a que já está presente no rio. Além disso, devido às dimensões do curso principal que, comparadas às dimensões dos afluentes, são maiores, o nitrogênio amoniacal despejado inicialmente pelo afluente 1 rapidamente se dispersa e é assimilado pelo restante do domínio, sem aumentar as concentrações nos pontos de monitoramento.

**Figura 21.** Gráfico da variação de  $C$  no ponto B ao longo do tempo  $t$  para cada valor de  $V1$ .



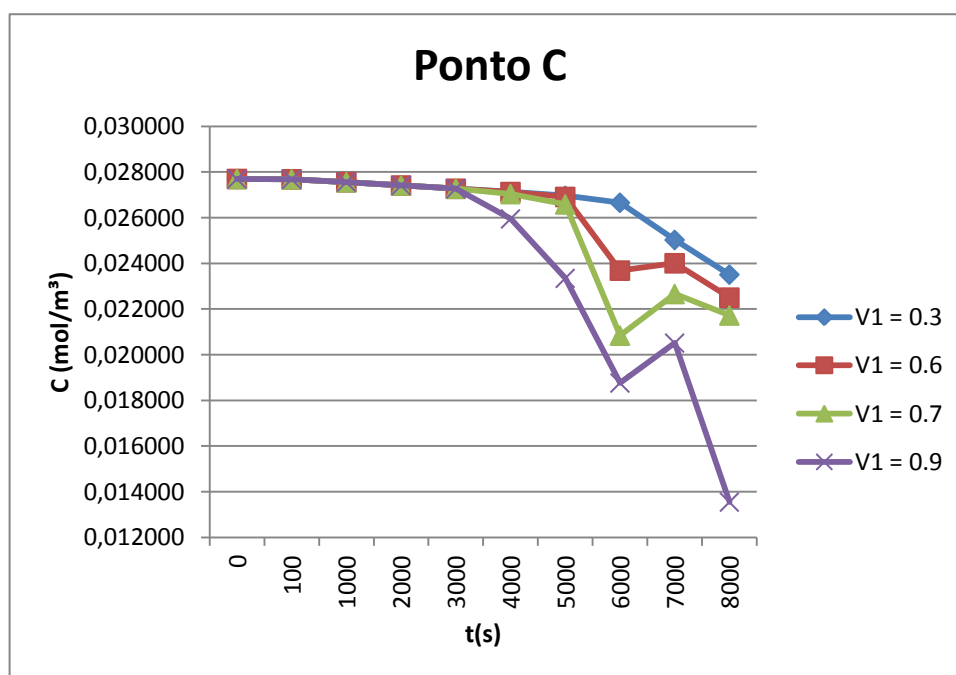
Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

Na Figura 21, pode-se ver com clareza como a velocidade do afluente 1 altera a concentração no ponto de monitoramento B: quanto maior a velocidade de entrada  $V1$ , menor a concentração de nitrogênio amoniacal. De acordo com o gráfico, pode-se afirmar que a região entra em regime permanente após o  $t = 1000$  s para todas as velocidades.



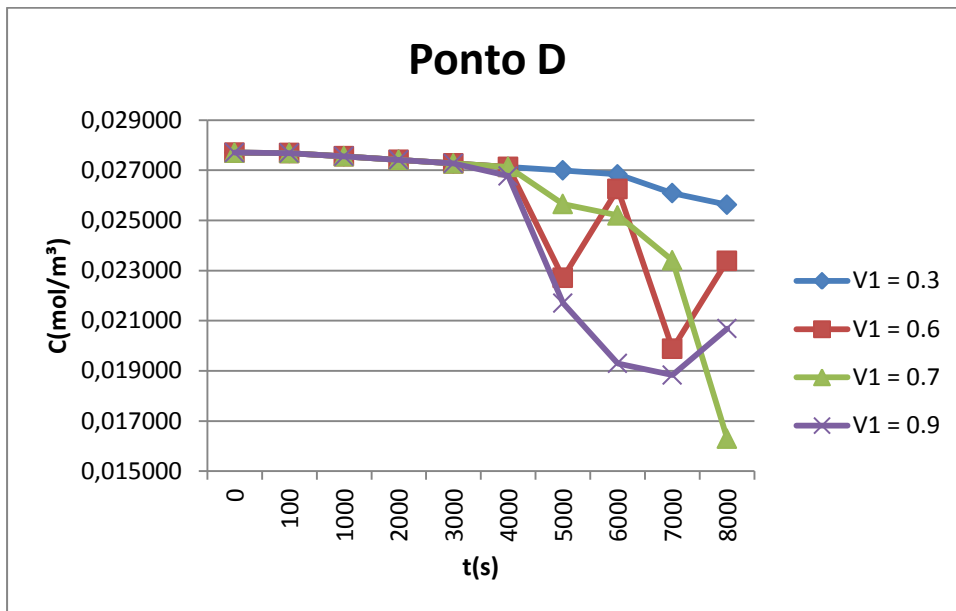
Nos pontos C, D, E e F (Figuras 22 a 25), que ficam mais próximos do final do trecho estudado, observam-se um comportamento contrário ao observado nos pontos A e B. A concentração de nitrogênio amoniacal diminui lentamente, como reflexo da absorção que ocorre ao longo do domínio, e a partir de  $t = 4000$  s vemos a influência da entrada do curso principal ( $E_p$ ) e do afluente 1. Na Figura 22, é visível a diminuição da concentração do poluente no Ponto C e da forma como a velocidade do despejo desse poluente influencia nessa concentração. Com uma maior velocidade de despejo do afluente 1, maior a quantidade dessa espécie com menor concentração de nitrogênio amoniacal será liberada no rio, sendo assim, a concentração será menor nesse ponto para diferentes velocidades. Vale ressaltar que o ponto C se encontra antes dos afluentes 2, 3 e 4, portanto não há influência deles nesse ponto do domínio. Já os pontos seguintes, D, E e F, são localizados após a entrada dos afluentes 2, 3 e 4, que despejam água pura, ou seja, a concentração de nitrogênio amoniacal nesses afluentes é de  $0 \text{ mol/m}^3$ . Nas Figuras 23, 24 e 25 observa-se uma diminuição da concentração, entretanto não consegue-se concluir a análise desses pontos de forma sólida, pois o escoamento ainda não atingiu o regime permanente.

**Figura 22.** Gráfico da variação de C no ponto C ao longo do tempo t para cada valor de V1.



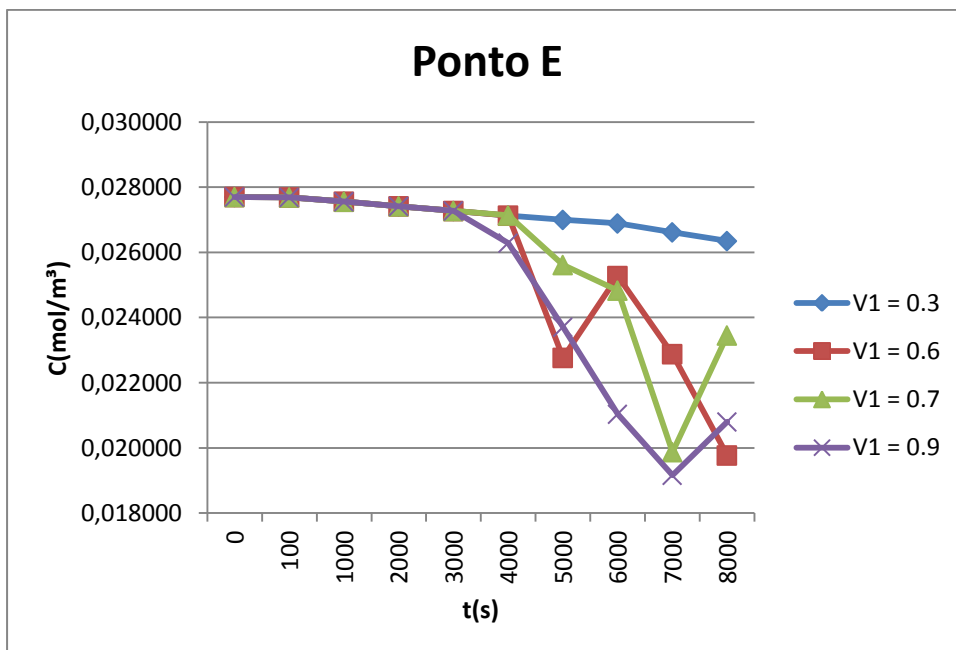
Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

**Figura 23.** Gráfico da variação de C no ponto D ao longo do tempo t para cada valor de V1.



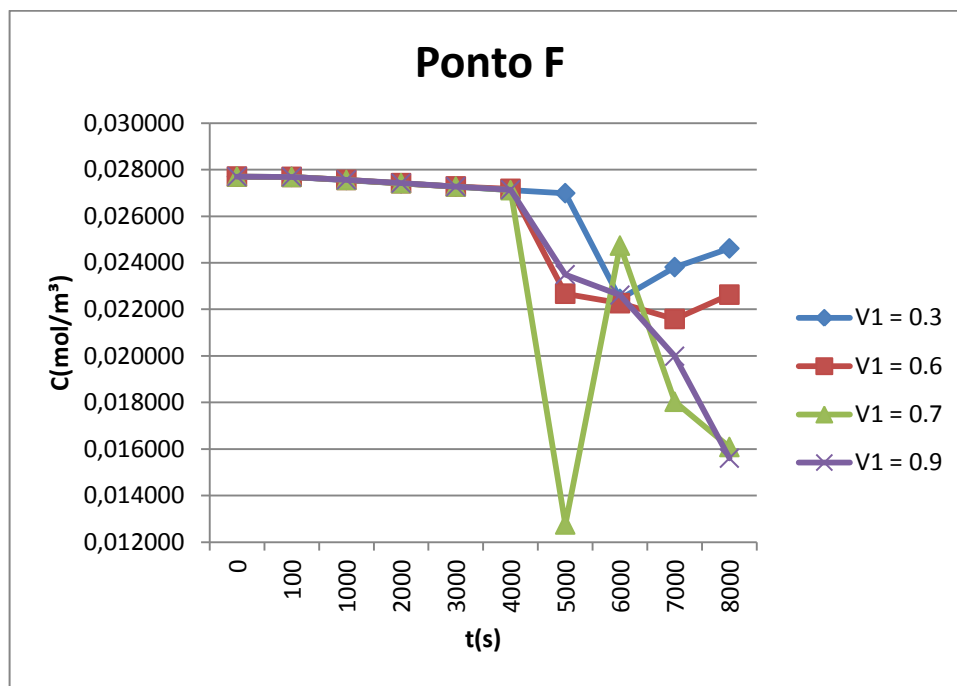
Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

**Figura 24.** Gráfico da variação de C no ponto E ao longo do tempo t para cada valor de V1.



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

**Figura 25.** Gráfico da variação de C no ponto F ao longo do tempo t para cada valor de V1.



Fonte: Software COMSOL (Projeto Fapesp 2014/06679-8).

## 7. Conclusões

A partir dos resultados obtidos no estudo do escoamento, pode-se notar uma mudança significativa na velocidade nos pontos de monitoramento: com o aumento das velocidades dos afluentes, houve também um aumento da velocidade no curso principal do domínio, que é mais notório no ponto F localizado após a entrada de todos os afluentes. Após a simulação feita desconsiderando a velocidade dos afluentes ( $V_a = V_b = 0$ ), observa-se claramente a diferença nos perfis de velocidade obtidos: a velocidade se altera apenas por influência das curvas do rio representadas no domínio, fenômeno que ocorre naturalmente em escoamentos para que a vazão se mantenha a mesma, uma vez que o escoamento já atingiu o regime permanente.

Já nos resultados obtidos no estudo da absorção e dispersão de poluentes, observa-se que a absorção de poluentes através das plantas acontece, porém numa escala pequena, de acordo com a estimativa, o que comprova que o processo de autodepuração se dá a partir da combinação não só desse, mas de diversos outros fatores e fenômenos naturais. Com as variações de velocidade do afluente 1, observa-se, mais nitidamente nos pontos B e C, que esse fator altera o resultado da concentração no curso principal do domínio do rio. Como visto anteriormente, quanto maior a velocidade maior será essa influência. Com relação à concentração de entrada do nitrogênio amoniacal despejado inicialmente pelo afluente 1, que diminui ao longo do tempo e rapidamente se dispersa e é assimilado pelo restante do domínio, o estudo nos comprova que para um rio com as dimensões do rio Paraíba do Sul, apenas uma fonte de poluição com as dimensões do ribeirão Taboão, o poluente é rapidamente disperso e assimilado pelo rio, entretanto, na realidade o que existem são diversos pontos de despejo de esgoto sanitário ao longo de todo curso do Rio, o que compromete a qualidade de sua água.

Um próximo passo para esse estudo seria realizar outras combinações de taxas de absorção, de concentrações de poluentes despejados e também de

outras espécies químicas despejadas ao longo do domínio, visando aproximá-lo cada vez mais da realidade.

## 8. Referências Bibliográficas

AGEVAP – Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, **Relatório Técnico: Bacia do Rio Paraíba do Sul - Subsídios às ações de melhoria da gestão**, 2011.

AGEVAP – Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, **Relatório Técnico: Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul - Resumo**. Tema C: Infestação de Macrófitas, 2007.

Alvarenga, L. A.; Martins, M. P. P.; Cuartas, L. A.; Penteado, V. A.; Andrade, A. **Estudo da qualidade e quantidade de água em microbacia, afluente do rio Paraíba do Sul – São Paulo, após ações de preservação ambiental**. *Ambi-Agua*, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 228-240, 2012.

Arpaci, V. S. **Conduction Heat Transfer**. Addison-Wesley Publishing Company, 1966. 550p.

Bejan, A. **Transferência de Calor**. Editora Edgard Blücher Ltda, 1996. 540p.

Boschilia, O. M. **Taxa de remoção de nitrogênio amoniacal, nitrato e NTK por *Salvinia herzogii* de la sota em wetland tipo lagoa**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica do Paraná, Londrina, 2014.

CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – Gestão da Bacia – **Dados Gerais**, disponível em <http://www.ceivap.org.br/dadosgerais.php> Acesso em 22 out. 2015.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – Publicações – **Águas Superficiais: Doces, Salinas e Salobras** – 2017 Apêndice K – Dados das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos, disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/> Acesso em 144 nov. 2018.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos da transferência de massa**. Campinas: Editora da Unicamp, 2002.

Diniz, H. N.; Galina, M. H.; Batista, G. T.; Targa, M. S. **Hidrogeologia da Várzea do Rio Paraíba do Sul: estudo de caso de uma área de mineração no município de Tremembé, SP, Brasil**. *Ambi-Água*, Taubaté, v. 5, p. 76-107, 2010.

Kather, C.; Diniz, H. N.; Targa, M. S.; Batista, G. T.; Rodrigues, E. M. **Características de infiltração de água nos solos da várzea do rio Paraíba do Sul, em Tremembé, SP**. p. 493–450, 2009.

Kury, K. A. **Despejo de esgoto no Rio Paraíba do Sul pelo centrourbano da cidade de Campos dos Goytacazes**. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, v. 2 n. 1, p. 117-149, 2008.

Leandro, Davi S. **Macrófitas aquáticas no Rio Paraíba do Sul: correlação entre diversidade vegetal e algumas características físicas e químicas da água e do sedimento**, 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

Marengo, J.; Alves, L. **Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, p. 215–226, 2005.

Metcalf & Eddy, Inc. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse**. McGraw-Hill International Editions, 3rd ed., New York, 1991.

OLIVEIRA, G. S.; MARTINS, J. A.; ROMÃO, E. C. **Análise da dispersão de poluentes no Ribeirão Taboão em Lorena por simulação numérica via COMSOL™**, 2017, disponível em <https://enamb.eel.usp.br/system/files/2017/trabalho/100/projetoenamb-giovannaenviar.pdf>, Acesso em 30 de nov. 2018

Rosa, D. M. **A evolução na qualidade das águas do rio Paraíba do Sul**. 267 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

Rosseti, R. P. **Evolução da carga orgânica de origem doméstica no rio Paraíba do Sul, no trecho paulista, no período de 1998-2007**. 193 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

Von Sperling, M. **Princípios do tratamento biológico de água residuárias**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.