



USO DE TRAÇADORES FLUORESCENTES PARA DETERMINAR  
CARACTERÍSTICAS DE TRANSPORTE E DISPERSÃO NO RIO PIABANHA/RJ

Paulo Vitor Ribeiro Marques da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: José Otavio Goulart Peclý

José Paulo Soares de Azevedo

Rio de Janeiro

Março de 2013

USO DE TRAÇADORES FLUORESCENTES PARA DETERMINAR  
CARACTERÍSTICAS DE TRANSPORTE E DISPERSÃO NO RIO PIABANHA/RJ

Paulo Vitor Ribeiro Marques da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D

---

Prof. José Otavio Goulart Peclly, D.Sc

---

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D

---

Prof. Celso Bandeira de Melo Ribeiro, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARCO DE 2013

Silva, Paulo Vitor Ribeiro Marques da

Uso de Traçadores Fluorescentes para Determinar Características de Transporte e Dispersão no Rio Piabanha/RJ/ Paulo Vitor Ribeiro Marques da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE. 2013

X, 173 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: José Otavio Goulart Pecly

José Paulo Soares de Azevedo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 159-167.

1. Traçadores fluorescentes em Hidrologia. 2. Transporte e dispersão de poluentes. 3. Modelagem hidrodinâmica e de transporte. I. Azevedo, José Paulo Soares de, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha família, que me apoiou, incentivou e me deu forças para alcançar este objetivo.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela oportunidade de ter uma família maravilhosa ao meu lado me apoiando incondicionalmente em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Ronald e Stella Máris, por estarem sempre presentes em minha vida me incentivando e me dando forças para vencer mais esta etapa.

Aos meus irmãos, Ronald Manoel e Tathiana, que eu amo muito e foram essenciais para realização desta conquista.

A minha namorada, Thaiza, pela compreensão e por estar sempre ao meu lado nos momentos em que mais precisei.

Ao meu orientador José Paulo Soares de Azevedo pela ajuda na escolha do tema deste trabalho e pelos conhecimentos transmitidos durante as disciplinas do mestrado.

Ao meu orientador José Otavio Goulart Pecly pela inestimável orientação a mim fornecida, pela dedicação, paciência, incentivo e por todo o conhecimento transmitido durante este trabalho.

Ao professor João Sérgio F. Roldão pelos conhecimentos fornecidos durante a realização deste trabalho e na disciplina de mestrado.

Ao Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ por toda a estrutura que me foi disponibilizada para realização de meu estudo. A toda equipe do laboratório, Amauri, Renato, Henrique e Neide por terem me acolhido e me ajudado a realizar este estudo.

Expresso aqui meu agradecimento ao CNPq pela bolsa de estudos a mim concedida durante a formação acadêmica de mestrado.

Adicionalmente, agradecimentos são extensivos ao suporte da FAPERJ, pelo apoio financeiro através dos projetos PEC/COPPE – FAPERJ 014/2010 (2010-2012) e projeto FAPERJ – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014), ao CNPq, por meio do projeto PROSUL (Edital CNPq nº 005/2007), bem como à FINEP, por meio do projeto HIDROECO (Hidrograma Ecológico e Modelagem Quali-quantitativa de Bacias).

A todos os meus colegas de mestrado, Vinicius, José Carlos, Jonathan, Nathalia, Iolanda, Carol, Bianca, Monique, Rafael e em especial a aluna de doutorado Claudia Daza, por toda a ajuda e compreensão nos trabalhos de campo desenvolvidos neste estudo.

Aos meus amigos de infância e de graduação, Felipe, Alan, Dearley, João Paulo e William que estão presentes até hoje, e a todos que de alguma forma ajudaram neste trabalho. Muito Obrigado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

USO DE TRAÇADORES FLUORESCENTES PARA DETERMINAR  
CARACTERÍSTICAS DE TRANSPORTE E DISPERSÃO NO RIO PIABANHA/RJ

Paulo Vitor Ribeiro Marques da Silva

Março/2013

Orientadores: José Otavio Goulart Pecly

José Paulo Soares de Azevedo

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho foi realizado em um trecho de aproximadamente 70 km do rio Piabanha, localizado entre Petrópolis e Areal, com objetivo de estimar as características de transporte e dispersão em escoamentos naturais usando técnicas de traçadores fluorescentes. Uma campanha de campo foi realizada para documentar características morfológicas ao longo do trecho estudado. A análise dos resultados de duas campanhas de campo com traçadores, realizadas no outono de 2012, permitiu determinar os valores de tempo de trânsito, vazão líquida, velocidade média e coeficiente de dispersão longitudinal. Utilizou-se os dados de vazão e velocidade média obtidos nos ensaios com traçadores para calibrar o modelo hidrodinâmico unidimensional HEC-RAS 4.1. Considerando que parâmetros hidráulicos obtidos por métodos convencionais em rios com geometria muito irregular como a do rio Piabanha não são adequados para representar as características médias de um trecho para uso em modelos hidrodinâmicos, os ensaios com traçadores representaram uma boa alternativa. Os resultados obtidos pelo HEC-RAS concordaram com os obtidos por meio dos ensaios com traçadores fluorescentes.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

USE OF FLUORESCENT TRACERS TO DETERMINE CHARACTERISTICS OF  
TRANSPORT AND DISPERSION IN PIABANHA RIVER/RJ

Paulo Vitor Ribeiro Marques da Silva

March/2013

Advisors: José Otavio Goulart Peclly

José Paulo Soares de Azevedo

Department: Civil Engineering

This work was carried out on a reach of approximately 70 km of Piabanha river, located between Areal and Petrópolis, in order to estimate the transport and dispersion characteristics in natural flows using fluorescent dye tracers techniques. A field campaign was carried out to document morphological features along the studied stretch. The results of field campaigns with dye tracers, conducted in the fall of 2012, allowed to determine the values of transit time, flow rate, mean flow velocity and longitudinal dispersion coefficient. The flow rate and mean velocity obtained in tests with tracers were used to calibrate the one-dimensional hydrodynamic model HEC-RAS 4.1. Whereas hydraulic parameters obtained by conventional methods for rivers with very irregular geometry such as river Piabanha are not suitable for representing the average characteristics of a section to use in hydrodynamic models, the results obtained with tracers represented a good alternative. The results obtained by the HEC-RAS agreed with those obtained by the experiments with fluorescent tracers.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. OBJETIVO.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. ESTUDOS NA BACIA DO RIO PIABANHA .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. USO DE TRAÇADORES.....</b>	<b>6</b>
2.2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS .....	6
2.2.2. APLICAÇÃO DE TRAÇADORES EM HIDROLOGIA .....	13
2.2.3. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO ESCOAMENTO.....	15
<b>2.3. TRANSPORTE DIFUSIVO-ADVECTIVO.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4. MODELAGEM MATEMÁTICA .....</b>	<b>22</b>
2.4.1. MODELOS HIDRODINÂMICOS .....	24
2.4.2. MODELOS DE TRANSPORTE.....	26
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1. ENSAIO COM TRAÇADORES .....</b>	<b>27</b>
3.1.1. CONDIÇÕES DE APLICABILIDADE DA TÉCNICA DE TRAÇADORES FLUORESCENTES.....	28
3.1.2. VISITA PRÉVIA AO LOCAL DE ESTUDO .....	28
3.1.3. PRÉ-DIMENSIONAMENTO.....	29
3.1.4. SELEÇÃO DE TRAÇADORES .....	30
3.1.5. CAMPANHAS DE CAMPO .....	30
3.1.6. ANÁLISE DAS AMOSTRAS .....	31
3.1.7. ANÁLISE DOS DADOS .....	32
3.1.8. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO ESCOAMENTO .....	32



<b>3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA .....</b>	<b>43</b>
3.2.1. MODELOS HIDRODINÂMICOS .....	43
3.2.1.1. FORMULAÇÃO USADA PELO HEC-RAS 4.1 .....	45
3.2.1.2. DADOS DE ENTRADA DO HEC-RAS 4.1 .....	50
3.2.2. MODELO DE TRANSPORTE DE MASSA.....	51
<b>4. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1. BACIA DO RIO PIABANHA.....</b>	<b>53</b>
4.1.1. LOCALIZAÇÃO.....	53
4.1.2. SUB-BACIAS .....	55
4.1.3. CARACTERÍSTICAS GERAIS .....	55
4.1.4. CARACTERIZAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO.....	57
<b>4.2. DESCRIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO RIO PIABANHA.....</b>	<b>60</b>
<b>4.3. CAMPANHAS DE MONITORAMENTO.....</b>	<b>99</b>
<b>4.4. ENSAIO COM TRAÇADORES .....</b>	<b>99</b>
4.4.1. EXPERIMENTO DE CAMPO .....	105
4.4.2. ANÁLISE DE LABORATÓRIO .....	110
<b>4.5. CAMPANHAS CONVENCIONAIS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE E TOPOBATIMETRIA.....</b>	<b>112</b>
<b>4.6. UTILIZAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS.....</b>	<b>119</b>
4.6.1. MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	119
4.6.2. MODELAGEM DE TRANSPORTE DE MASSA.....	123
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>123</b>
<b>5.1. EXPERIMENTO DE CAMPO.....</b>	<b>123</b>
5.1.1. TRAÇADORES FLUORESCENTES.....	124
5.1.2. MEDIÇÃO CONVENCIONAL.....	146
<b>5.2. MODELOS COMPUTACIONAIS .....</b>	<b>147</b>

5.2.1. MODELO HIDRODINÂMICO (HEC-RAS 4.1) .....	147
5.2.2. MODELO ANALÍTICO DE TAYLOR.....	151
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>153</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>159</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>168</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A água é fundamental para a vida e, em várias partes do mundo, é finita e já escassa, tanto qualitativamente quanto quantitativamente. Isto ocorre, não somente pelo aumento da demanda por água, que é proporcional ao aumento da população, mas também pela diminuição da oferta, que em sua maioria é resultado da poluição das mananciais.

De acordo com ROSSO (1986), o crescimento industrial desordenado e o desenvolvimento econômico acarretaram o aumento significativo do volume de despejos de águas residuárias de origem doméstica e industrial nos corpos hídricos causando assim, em grande maioria, problemas complexos de poluição. O despejo dessa massa poluidora compromete a qualidade da água, com prejuízos ao meio ambiente e ao abastecimento da população, da agricultura e das indústrias.

Para evitar perigos a saúde da população que utiliza esta água, seja diretamente, utilizando-a para consumo próprio, seja indiretamente, derivada de produtos advindos da agricultura e indústrias, é necessário tomar medidas que evitem esta contaminação.

O planejamento preventivo é de extrema importância para minimizar os prejuízos causados à saúde pública e à economia por um despejo acidental ou intencional de poluentes e, para isso, é imprescindível o conhecimento de características hidrodinâmicas, de transporte e de mistura de determinados trechos de importância do corpo d'água em estudo, pois com o conhecimento das mesmas, é possível identificar medidas a serem tomadas a jusante, caso ocorra algum despejo acidental ou intencional de poluentes.

Os parâmetros hidráulicos, que são necessários para o conhecimento das características de transporte, podem ser obtidos com facilidade por métodos convencionais bem conhecidos ou por métodos não convencionais com a utilização de traçadores.

Os traçadores fluorescentes são muito eficazes quando empregados em estudos de hidrologia de superfície e subterrânea, e para diversos problemas relacionados com a poluição das águas. Alguns exemplos de aplicações de traçadores são descritas a seguir:

- medição de vazões em tubulações e canais abertos;

- determinação de tempo de trânsito e do coeficiente de dispersão de poluentes em rios e lagos;
- avaliação de eficiência de emissários submarinos em águas estuarinas e costeiras;
- caracterização da capacidade natural de reaeração em rios;
- determinação de parâmetros hidrodinâmicos em plantas de tratamento de esgoto;
- medição de vazões turbinadas em instalações hidroelétricas de médio e grande porte.

A predição de acidentes ambientais e o estudo de qualidade da água é uma preocupação constante; por isto, segundo OKUBO (1968a), inúmeros modelos numéricos têm sido utilizados para previsão do comportamento dos contaminantes. Entretanto, nem sempre é adequado explicar com abordagens teóricas o processo de dispersão em corpos hídricos naturais, levando assim a necessidade de estudos práticos envolvendo experimentos de campo.

Os mecanismos de transporte e dispersão de um poluente são dependentes das variações no campo da velocidade de um curso de água natural. As características de mistura são complexas, pois dependem das características hidráulicas e do processo de transporte difusivo-advectivo. A equação difusiva-advectiva unidimensional é muito utilizada para prever a qualidade da água em corpos hídricos naturais, sendo o coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ) um dos parâmetros mais importantes para a modelagem unidimensional.

A determinação do coeficiente de dispersão ( $D_L$ ) pode ser realizada a partir de ensaios com traçadores, que é considerado um método adequado se preenchidas algumas condições básicas. Os traçadores fluorescentes quando misturados com o corpo hídrico simulam de forma real o movimento e a dispersão de um poluente solúvel passivo, possibilitando assim o monitoramento das características de transporte e dispersão de um corpo d'água.

Os ensaios com traçadores fluorescentes fornecem não somente o coeficiente de dispersão ( $D_L$ ), que é um parâmetro importantíssimo para modelagens de transporte e qualidade de água, mas também dados hidrodinâmicos, que podem ser utilizados para alimentação e calibragem de modelos hidrodinâmicos.

Em geral, os modelos hidrodinâmicos antecedem a modelagem de transporte e qualidade de água, devido à necessidade de se ter bem definidos os parâmetros hidráulicos do corpo hídrico envolvido no estudo.

## **1.1. OBJETIVO**

O estudo desenvolvido neste trabalho tem como objetivo geral contribuir para a gestão de recursos hídricos com conhecimentos teóricos e práticos de metodologias de estudo das características de transporte e dispersão, ocasionados por um despejo acidental de poluentes solúveis em um sistema fluvial, e suas conseqüências para a qualidade da água.

O sistema fluvial escolhido para aplicar a metodologia proposta é um trecho do rio Piabanha com 70 km de extensão aproximadamente, situado entre a confluência dos rios Avelá-Leman e Piabanha, na cidade de Petrópolis, e o município de Areal, ambos situados na bacia do rio Piabanha, Rio de Janeiro. O local de estudo possui diferentes características ao longo de sua extensão, com variações de geometria altamente perceptíveis em sua calha, com diferentes campos de velocidade, com trechos de acentuadas declividades e trechos de baixa declividade.

Os métodos convencionais são muito eficazes para medições de velocidade média em determinadas seções transversais, porém são inapropriados quando se busca representar um trecho com as características do rio Piabanha, dificultando assim o uso desta velocidade média na calibração de modelos. Tendo em vista que os ensaios com traçadores fluorescentes fornecem velocidades médias para trechos pré-determinados, buscou-se desenvolver um estudo com o uso de traçadores fluorescentes para auxiliar na calibração de um modelo hidrodinâmico unidimensional.

Para alcançar os objetivos principais deste trabalho, devem ser obtidos alguns objetivos específicos listados a seguir:

- apresentar uma descrição das características morfológicas do trecho estudado;
- realizar ensaios de campo com traçadores fluorescentes no trecho de interesse do estudo e detectar as curvas de passagem da nuvem de traçadores fluorescentes nas seções de monitoramento;
- avaliar as condições de mistura lateral;

- verificar a adequação do método da diluição para o cálculo da vazão líquida;
- determinar velocidade média, tempo de trânsito e os coeficientes de dispersão nos trechos estudados;
- avaliar o desempenho dos traçadores fluorescentes Amidorodamina G e Uranina no trecho em estudo;
- avaliar o uso dos resultados do experimento de campo com traçadores fluorescentes na calibração de um modelo hidrodinâmico unidimensional.

## **1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho está organizado em seis capítulos, sendo este capítulo introdutório o primeiro.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura que guiou a realização desta dissertação, sendo esta revisão dividida em blocos: primeiramente são apresentados estudos importantes realizados na bacia do rio Piabanha; em seguida é apresentado um bloco a respeito do uso de traçadores, explicando suas características gerais e exemplificando suas utilizações em hidrologia; por último são apresentados estudos realizados com modelos hidrodinâmicos e de transporte de massa.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia empregada para os ensaios de campo com o uso de traçadores fluorescentes e as metodologias de cálculo utilizadas para determinação dos parâmetros hidráulicos e de transporte, tendo como base os experimentos de campo, a modelagem hidrodinâmica usando o modelo computacional HEC-RAS 4.1 e a modelagem de transporte de massa, realizada pelo modelo analítico de Taylor.

Partindo da metodologia abordada no capítulo anterior, o Capítulo 4 apresenta uma caracterização do rio Piabanha e de seu regime hidrológico com base em visitas de campo e na literatura existente. Neste capítulo também são descritas as campanhas de campo com traçadores fluorescentes e de medições convencionais, realizadas com o objetivo de conhecer as características de transporte e dispersão no trecho estudado. O uso de modelos hidrodinâmicos e de transporte também são abordados neste capítulo.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e as discussões referentes aos ensaios de campo e modelagens apresentadas no capítulo 4.

O Capítulo 6 aborda as conclusões a respeito de todos os resultados obtidos, além de recomendações, com o objetivo de incentivar futuros estudos relacionados a modelagens hidrodinâmicas e de transporte na área de estudo.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas, que auxiliaram para o desenvolvimento desta dissertação, e o apêndice, contendo o desenvolvimento da equação do transporte advectivo e difusivo (equação de Taylor) e tabelas referentes a algumas seções transversais do rio Piabanha.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. ESTUDOS NA BACIA DO RIO PIABANHA**

Muitos foram os estudos já realizados na bacia do rio Piabanha, dentre eles, os estudos de ROSSO (1986), KLING (2005), GONÇALVES (2008), LOU (2010), PAULA (2011), MOLINARI (2011) e BARROS (2012).

ROSSO (1986) realizou estudos com traçadores radioativos e fluorescentes na bacia do rio Piabanha, no trecho compreendido entre Pedro do Rio e Areal. Seu objetivo principal foi o de determinar experimentalmente o coeficiente de dispersão e comparar os resultados obtidos para os diferentes tipos de traçadores utilizados.

KLING (2005) avaliou os impactos ambientais que originam a poluição e o comprometimento dos recursos naturais da bacia hidrográfica do rio Piabanha, localizada na região serrana do Rio de Janeiro, devido à rápida urbanização ocorrida nas sete cidades que são formadoras desta bacia.

GONÇALVES (2008) analisou a estimativa de parâmetros hidrológicos para a sub-bacia de Pedro do Rio, localizada na bacia hidrográfica do rio Piabanha, no município de Petrópolis/RJ. Em seu estudo foi realizado uma modelagem hidrológica usando os modelos SMAP e TOPOMODEL.

LOU (2010), assim como GONÇALVES (2008), executou um diagnóstico na sub-bacia de Pedro do Rio. Em seu estudo foi utilizado o MODCEL-COPPE/UFRJ (Modelo de células) para simular o escoamento do rio e seus resultados foram comparados com os resultados obtidos a partir dos modelos SMAP e TOPMODEL.

PAULA (2011) realizou um diagnóstico e avaliou as condições atuais e futuras da qualidade da água da bacia do rio Piabanha. A partir de análise de dados e informações disponíveis, implementou um modelo matemático unidimensional para avaliação de parâmetros de qualidade da água.

MOLINARI (2011) realizou uma avaliação da vazão ecológica do ponto de vista da qualidade das águas na bacia do rio Piabanha. Em seu estudo o parâmetro da DBO foi o escolhido para a avaliação, devido à grande carga orgânica lançada nesta área.

BARROS (2012) utilizou dados do satélite Landsat5-TM e o algoritmo *SEBAL* para estimar a evapotranspiração e os componentes do balanço de energia. Para verificar os resultados da evapotranspiração, foram utilizados dados meteorológicos das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), nas cidades de Petrópolis e Teresópolis, e dados meteorológicos da estação do projeto de estudos integrados de bacias experimentais (EIBEX).

## **2.2. USO DE TRAÇADORES**

### **2.2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS**

Um traçador pode ser definido como qualquer material solúvel ou insolúvel que seja utilizado para determinar o caminho, tempo de trânsito e da dispersão de materiais similares na água (WILSON JR. *et al.*, 1986).

Surgindo da necessidade de monitorar os fluxos de água e de contaminantes presentes em corpos hídricos, o uso de traçadores em hidrologia é muito antigo. Em muitos casos o uso de traçadores pode complementar os chamados “métodos tradicionais” (que não envolvem o uso de traçadores) e em alguns casos especiais podem fornecer resultados impossíveis de serem obtidos por meio das técnicas convencionais. Os traçadores podem ser radioativos ou inativos, sendo ambos subdivididos em ambientais ou artificiais, como é ilustrado na **Figura 1**.



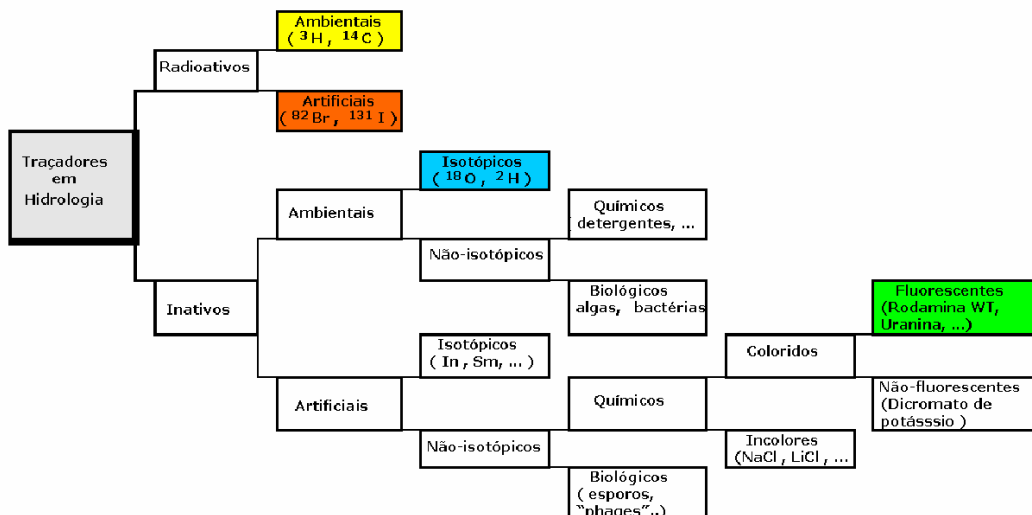


Figura 1: Divisão dos tipos de traçadores utilizados em hidrologia. Fonte: ROLDÃO e PECLY (2011).

Segundo ROLDÃO e PECLY (2011), os traçadores ambientais (naturais) e artificiais possuem as seguintes propriedades:

#### Traçadores ambientais (naturais)

- são substâncias que ocorrem de maneira natural no meio ambiente ou são lançadas inadvertidamente pela atividade humana e posteriormente, devido à sua persistência, tornam-se utilizáveis como traçadores hidrológicos;
- são normalmente empregados no estudo de grandes regiões ou em ensaios de média ou longa duração;
- a injeção do traçador é realizada sem a intervenção do experimentador e, normalmente, é complexa ou mesmo desconhecida;
- a medição de traçador *in situ* é normalmente complexa;
- em geral, o custo do traçador é inexistente;
- o alto preço do equipamento do laboratório e o longo tempo para preparar uma amostra geram um custo bastante alto na medição da mesma.

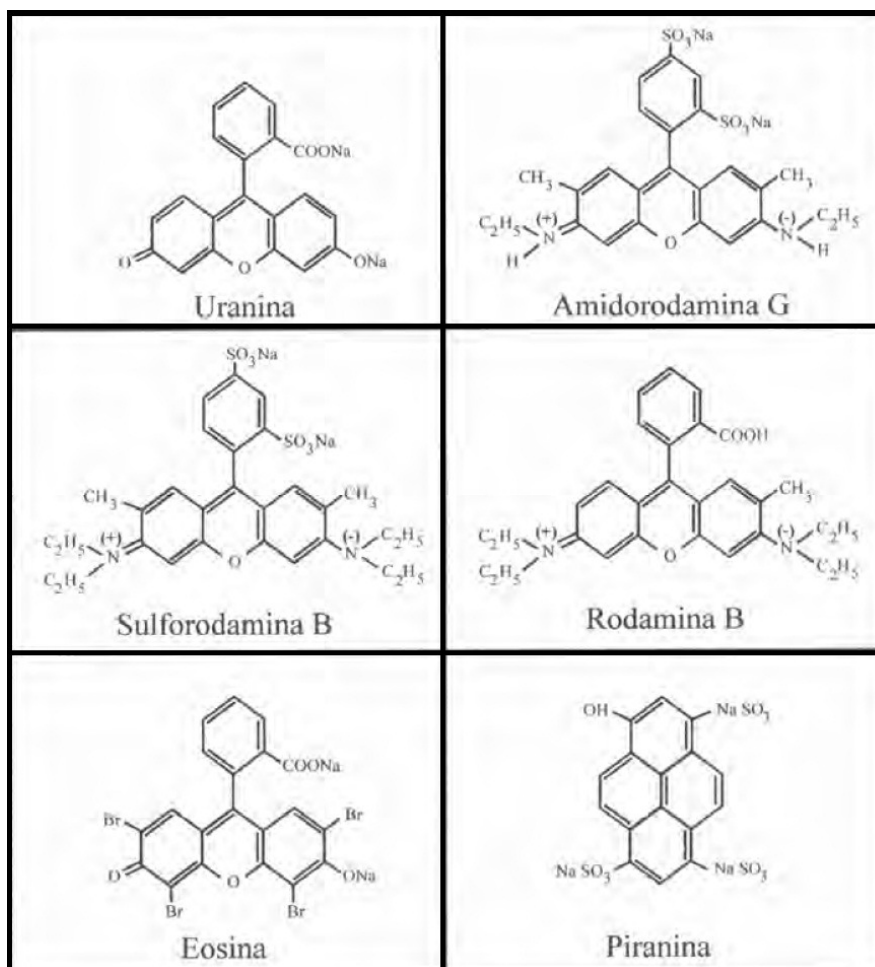
### Traçadores artificiais

- são substâncias introduzidas no meio ambiente e monitoradas para identificar o movimento da água;
- são normalmente empregadas em estudos de pequenas regiões ou em ensaios de curta ou média duração;
- a injeção do traçador no meio é feita de forma intencional e controlada;
- em geral, a medição do traçador é fácil de ser realizada *in situ* e no laboratório;
- o traçador pode ter custo significativo;
- o tempo de preparação e medição de uma amostra é curto e o custo do equipamento é relativamente baixo, resultando assim em custos relativamente baixos nas análises das amostras.

Conforme é mostrado na **Figura 1**, diversos tipos de traçadores podem ser utilizados em estudos hidrológicos. Contudo, segundo RIBEIRO (2007), os traçadores radioativos artificiais e os inativos artificiais fluorescentes são os mais utilizados. No entanto, segundo WILSON JR *et al* (1986), os traçadores fluorescentes começaram a ser comumente utilizados na década de 60, devido à dificuldades em se obter licenças para o uso de traçadores radioativos.

### Traçadores fluorescentes

Os traçadores fluorescentes são substâncias orgânicas (**Figura 2**) que apresentam a propriedade de emitir luz, fluorescência, numa determinada faixa de comprimentos de onda, quando submetidas a uma luz de excitação em uma faixa de comprimento de onda, às quais são sensíveis.



**Figura 2:** Fórmulas estruturais dos principais corantes fluorescentes utilizados em estudos hidrológicos. Fonte: ROLDÃO e PECLY (2011).

STOKES (1852) *apud* ROLDÃO e PECLY (2011) descreveu o fenômeno de fluorescência a partir da observação de matérias com a propriedade de converter radiação UV em radiação com maiores comprimentos de onda que, assim, são visíveis.

Devido às impossibilidades de se realizar medições precisas e eficientes utilizando-se os sentidos humanos, recorre-se a métodos instrumentais para as medições das fluorescências dos traçadores fluorescentes. Estes equipamentos são o fluorímetro de campo e o espectrofluorímetro.

Os fluorímetros são equipamentos mais simples, robustos, portáteis e fáceis de operar, apropriados para realizarem a leitura da fluorescência da amostra durante as campanhas de campo.

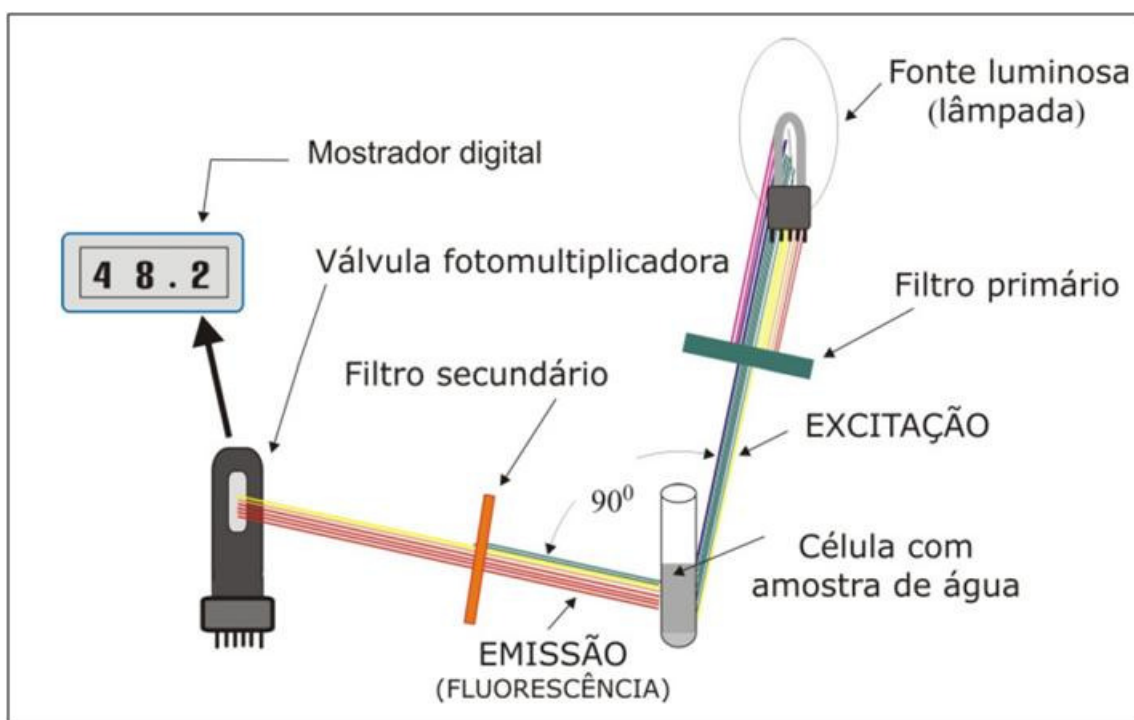
Seu sistema de medição é constituído por uma lâmpada com espectro de emissão limitado, filtros (primário e secundário) seletores de bandas do espectro e uma válvula

fotomultiplicadora que transforma a energia luminosa em energia elétrica e um dispositivo que apresenta os resultados de forma analógica ou digital.

O filtro primário serve para selecionar os comprimentos de onda, oriundos da fonte de luz, que irão alcançar a amostra. Este filtro é escolhido de modo a promover grande excitação do material estudado e mínima excitação de qualquer outro material interferente que possua fluorescência.

O filtro secundário (emissão ou fluorescência) serve para selecionar os comprimentos de onda que efetivamente foram emitidos pelo material durante a fluorescência e minimizar a luz emitida por materiais interferentes que possam estar presentes na amostra.

Na **Figura 3** é apresentado um esquema simplificado do funcionamento de um fluorímetro utilizado para medições de fluorescência das amostras.



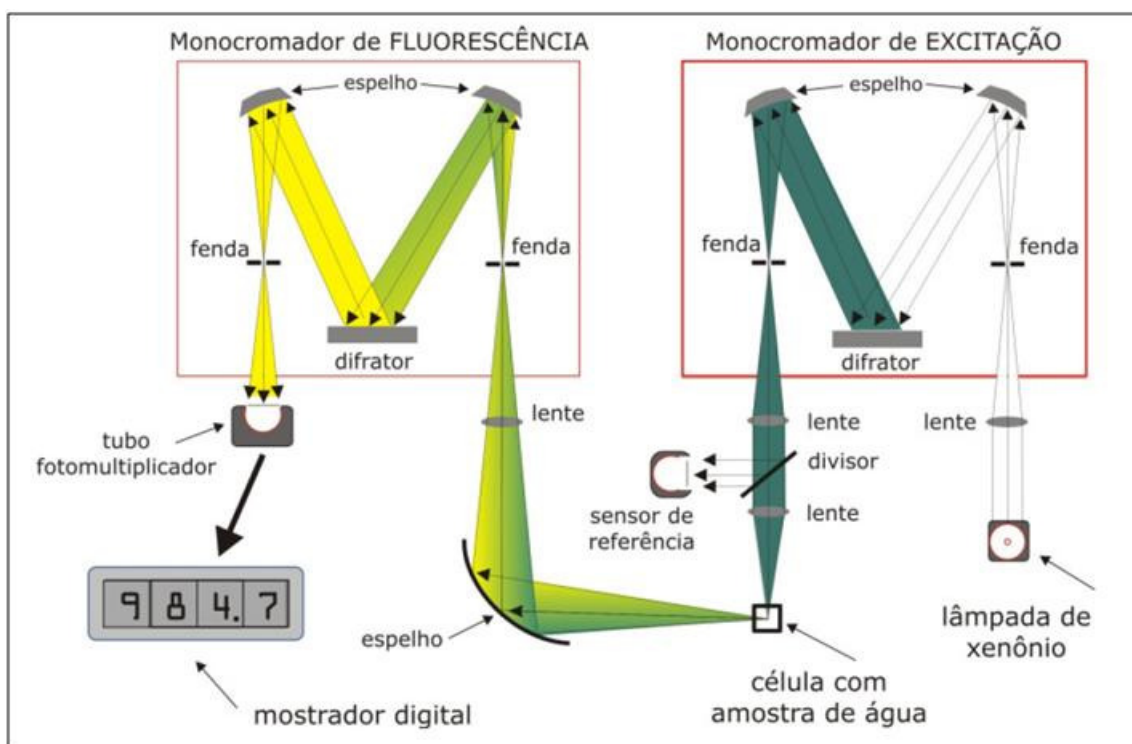
**Figura 3:** Esquema simplificado de um fluorímetro de filtros. Fonte ROLDÃO e PECLY (2011).

Os espectrofluorímetros são equipamentos sofisticados e frágeis destinados ao uso apenas em laboratório. Estes equipamentos permitem análises qualitativas e quantitativas precisas e detalhadas.

Seu sistema de medição é constituído por uma lâmpada, em geral de xenônio, com espectro de emissão amplo, monocromadores, de excitação e de emissão, uma válvula fotomultiplicadora, que transforma a energia luminosa em energia elétrica e um dispositivo que apresenta os resultados de forma analógica ou digital. Dentro do largo espectro de emissão da lâmpada, cada um dos comprimentos de onda é selecionado através de um sofisticado sistema ótico (monocromadores). O comprimento de onda selecionado é mostrado numericamente no painel do equipamento.

O sistema ótico (constituído por monocromadores) decompõe a luz emitida pela lâmpada selecionando uma banda estreita de comprimentos de onda de excitação, com precisão de nanômetros, que incidem sobre a amostra. Um segundo conjunto de monocromadores seleciona uma banda estreita de comprimentos de onda da luz emitida pela amostra.

A **Figura 4** apresenta um esquema simplificado de medição de amostras contendo traçadores fluorescentes com o espectrofluorímetro.



**Figura 4:** Esquema simplificado de medição com espectrofluorímetro. Fonte ROLDÃO e PECLY (2011).

A sensibilidade dos equipamentos que medem a fluorescência é uns dos fatores que podem explicar o uso de traçadores fluorescentes em hidrologia. Ainda neste contexto, segundo ROSSO (1986) e RIGO (1992), o fato dos traçadores fluorescentes serem utilizados em hidrologia se dá, também, por possuir alta capacidade de solubilidade em água, facilidade em sua obtenção, baixo custo, não necessita de pessoas altamente qualificadas para manuseio do material e a necessidade de uma pequena amostra de volume de água para se analisar.

Ao longo do tempo, vários traçadores fluorescentes, tais como: Rodamina B, Rodamina WT, Sulforodamina B, Uranina, Amidorodamina G, Eosina e Piranina têm sido testados e utilizados. Alguns foram desenvolvidos para o atendimento de finalidades específicas e cada um deles possui vantagens e desvantagens, como é visto na **Tabela 1**, que devem ser exploradas pelo responsável do estudo em função das condições locais.

**Tabela 1: Vantagens e desvantagens de alguns traçadores fluorescentes. Fonte: ROLDÃO e PECLY (2011).**

NOME	Color Index e Nome	$\lambda$ (nm) Excit.	$\lambda$ (nm) Fluor.	Limite de Detecção (mg/m <sup>3</sup> )	OBSERVAÇÕES
Rodamina B	45 170 Basic Violet 10	554	578	0,01 a 0,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>↑ Baixo fotodecaimento</li> <li>↓ Alta adsorção</li> <li>↓ Sensível a temperatura</li> <li>↑ Fácil disponibilidade</li> <li>↔ Uso em casos especiais</li> </ul>
Rodamina WT	--- Acid Red 388	558	582	Sem dados	<ul style="list-style-type: none"> <li>↑ Baixo fotodecaimento</li> <li>↑ Relat. baixa adsorção</li> <li>↓ Difícil obtenção</li> <li>↔ Bastante usada nos EUA</li> </ul>
Sulforodamina B	45 100 Acid Red 52	565	590	0,001 a 0,05	<ul style="list-style-type: none"> <li>↑ Baixo fotodecaimento</li> <li>↓ Relat. sensível a perdas</li> <li>↓ Difícil obtenção</li> <li>↔ Uso relat. limitado</li> </ul>
Fluoresceína (Uranina)	45 350 Acid Yellow 73	492	515	0,001 a 0,03	<ul style="list-style-type: none"> <li>↓ Alto fotodecaimento</li> <li>↑ Difícil adsorção</li> <li>↑ Fácil obtenção</li> <li>↔ Uso em casos especiais</li> </ul>
Sulforodamina G (Amidorodamina G)	45 220 Acid Red 50	535	552	0,001 a 0,05	<ul style="list-style-type: none"> <li>↑ Baixo fotodecaimento</li> <li>↑ Baixa adsorção</li> <li>↓ Difícil obtenção</li> <li>↔ Uso bastante indicado</li> </ul>
Eosina	45 380 Acid Red 87	515	535	0,05 a 0,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>↓ Altíssimo fotodecaimento</li> <li>↑ Relat. baixa adsorção</li> <li>↑ Fácil obtenção</li> <li>↔ Uso pouco indicado</li> </ul>
Piranina	59 040 Solvent Green 7	455	515	0,04 a 0,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>↑ Rel. baixo fotodecaimento</li> <li>? Adsorção pouco conhec.</li> <li>↓ Difícil obtenção</li> <li>↔ Uso pouco indicado</li> </ul>

De acordo com BEHRENS *et al* (2001), um grupo de especialistas da Agência Ambiental Federal Alemã, nas áreas de hidrologia, ecotoxicidade, pedologia e química, avaliaram o uso de traçadores fluorescentes em águas subterrâneas e superficiais com o auxílio de testes toxicológicos e revisões em literaturas e, concluíram que a Uranina, Amidorodamina G, Eosina e Piranina são recomendados e a Rodamina B, Sulforodamina B e Rodamina WT não são recomendados no ponto de vista da ecotoxicidade.

De acordo com a **Tabela 1**, existem fatores que podem prejudicar a utilização de traçadores fluorescentes, sendo estes, temperatura, reação química, pH, fotodecomposição, biodegradação, salinidade e *background* do local estudado (WILSON JR. *et al.*, 1986 e RIGO, 1992). Com isso, é de crucial importância a escolha do traçador a ser utilizado e, para isto, é necessário se conhecer as características do corpo hídrico no qual será injetado o traçador e, além disso, o ponto de injeção, a localização dos pontos de medida e a geometria de detecção devem ser bem definidos (RAMOS, 2006).

### 2.2.2. APLICAÇÃO DE TRAÇADORES EM HIDROLOGIA

Os traçadores são muito eficazes para estudos em águas superficiais, sendo eles: determinar parâmetros de transporte e dispersão para calibrar modelos matemáticos; estudos sedimentológicos; medidas de vazão de cursos de água; planejamento prévio visando minimizar problemas ocasionados por despejos de poluentes, dentre outras aplicações (RIBEIRO, 2007).

Abaixo são apresentados alguns estudos já realizados com esta técnica.

Em ROLDÃO *et al.* (1995), o uso de traçadores fluorescentes foi empregado para determinação da capacidade de diluição do emissário submarino da Aracruz Celulose S.A., localizada no estado do Espírito Santo. Neste contexto, ROLDÃO *et al.* (1998b) utilizam a técnica de traçadores para medir e avaliar a diluição do esgoto lançado no emissário submarino de Ipanema, na cidade do Rio de Janeiro. Em PECLY (2000) é utilizado à técnica de traçadores artificiais e ambientais no monitoramento do emissário submarino de Ipanema para diferentes situações climatológicas e hidrodinâmicas. BARBOSA (2012) utiliza modelagem computacional com o suporte de técnicas de interpretação de imagens de satélite e de campanhas de campo com o uso de

traçadores fluorescentes para avaliar o campo de diluição do emissário submarino industrial da empresa Fibria S.A., localizada no estado do Espírito Santo.

Em AZEREDO (1985), a técnica de traçadores fluorescentes e radioativos foi utilizada para determinação de parâmetros hidráulicos, com a finalidade de se estudar o comportamento hidrodinâmico de uma unidade de decantação primária de uma estação de tratamento de esgotos, localizada na Ilha do Governador, Rio de Janeiro.

ROSSO (1986) utiliza a técnica de traçadores fluorescentes e radioativos para determinar o coeficiente de dispersão no trecho inferior do rio Piabanha, localizado no estado do Rio de Janeiro. RIGO (1992) determinou o coeficiente de dispersão longitudinal em um trecho do rio Paraíba do Sul e também no trecho compreendido entre a Estação Elevatória de Santa Cecília e a Estação de Tratamento de Água do Guandu utilizando três tipos de traçadores fluorescentes, sendo eles a Uranina, Amidorodamina G e Sulforodamina B.

Em ROLDÃO *et al.* (1996), os coeficientes de dispersão longitudinal e transversal do escoamento na Laguna Setubal em Santa Fé, Argentina, foram determinados com os resultados obtidos a partir da utilização de traçadores fluorescentes, sendo estes a Amidorodamina G e a Uranina. DEVENS (2006) utilizou a técnica de traçadores para determinar o coeficiente de dispersão longitudinal em trechos de pequenos cursos d'água da região de Ouro Preto, MG. RIBEIRO (2007) utilizou a técnica dos traçadores fluorescentes para determinar o coeficiente de dispersão no rio Pomba, MG. SOARES *et al.* (2010) determinam *in situ* as características de transporte e dispersão, com o uso de traçadores fluorescentes, de um trecho de 27 km do rio Paraíba, localizado entre o distrito industrial I e a UHE de Marmelos Zero.

AMARAL (2009) e GIORI (2011) utilizaram um modelo analítico unidimensional, calibrado com os dados relativos às características de transporte e dispersão obtidos por meio de ensaios com traçadores fluorescentes, para prever as consequências de um despejo acidental de poluentes num trecho do rio Paraíba do Sul, entre Volta Redonda e Barra do Pirai e no rio Guandu, respectivamente, ambos localizados no estado do Rio de Janeiro.

Além de determinar as características de dispersão, os traçadores podem ser eficazes para determinar a vazão líquida, como apresentado em ROLDÃO (1973), que utilizou traçadores para medir vazões na Rede de Distribuição de Água de Refrigeração



de Máquinas – REDUC (PETROBRAS). SOUZA (1997) utilizou o Método da Diluição com Injeção Contínua de traçadores fluorescentes para determinar vazões turbinadas na Usina Hidrelétrica de Funil, Itatiaia – RJ. Em ROLDÃO *et al.* (1998a), foi utilizada a técnica dos traçadores fluorescentes para determinar a vazão e o coeficiente de dispersão longitudinal nos rios Corumbá e Pirapetinga. CASTRO (2000) determinou a vazão turbinada da Usina Hidrelétrica de Mascarenhas de Moraes, a partir da avaliação da capacidade de mistura completa dos traçadores fluorescentes Uranina e Amidorodamina G em tubulações curtas, que é característica de grande parte das hidrelétricas brasileiras.

### 2.2.3. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO ESCOAMENTO

A estimativa da vazão pelo método dos traçadores está diretamente ligada à capacidade do traçador em se misturar no meio em que foi injetado, isto é, caso se obtenha por completo a mistura vertical/lateral é possível calcular a vazão líquida; caso não ocorra boa mistura, torna-se imprópria à estimativa da vazão líquida. Neste contexto, a vazão pode ser determinada a partir do tempo de trânsito, da curva de passagem (método da integração) e do método da diluição, como é observado nos estudos a seguir. Não se encontrou na literatura referência a estudos que determinassem a vazão a partir do tempo de trânsito.

ROSSO (1986), em seu trabalho no rio Piabanha, utilizou o método da integração para calcular a vazão líquida. Este método baseia-se em um balanço de massa do traçador estabelecido entre uma seção a montante (seção de injeção) e uma seção situada a jusante (seção de coleta de amostras). A vazão líquida é determinada a partir da divisão entre a massa de traçador injetada e a área sob a curva de passagem, ou seja, a integral da curva de concentração versus tempo.

O método da diluição foi utilizado por ROLDÃO *et al.* (1997), para medir vazões líquidas em túneis de desvio das barragens de Serra da Mesa e Corumbá. Assim como o método da integração, este método também se baseia no balanço de massa.

É necessário assegurar que a DBM (Distância de Boa Mistura) foi atingida entre os trechos de injeção e amostragem para ser possível determinar a vazão do escoamento. Portanto, a seção de coleta de amostras deve-se localizar a uma distância ótima a jusante

do ponto de injeção, de modo a garantir uma mistura vertical/transversal completa do traçador fluorescente com a água do escoamento.

Existem na literatura muitos autores que utilizam fórmulas empíricas para estimar a DBM, porém os resultados obtidos por estas equações fornecem apenas informações indicativas para o caso de aplicações em rios (ROSSO, 1986). Assim como ROSSO (1986), CASTRO (2000) utilizou fórmulas empíricas de diversos autores para estimar a DBM em seu trabalho.

Contudo, essas fórmulas empíricas normalmente não fornecem boas estimativas para a DBM, pois levam em consideração características hidrodinâmicas locais e/ou coeficientes empíricos difíceis de serem medidos. Sendo assim, recomenda-se verificar a DBM por meio de experimentos de campo, que consiste em coletar amostras simultaneamente em diferentes verticais nas seções de monitoramento e comparar as curvas de passagem dos traçadores fluorescentes em cada uma das verticais.

Outro parâmetro que pode ser facilmente determinado pelo uso de traçadores é a velocidade média de cada trecho do escoamento, que é obtida a partir da divisão da distância entre os centróides (centro ponderado) das curvas de passagem pelo tempo de trânsito da nuvem do traçador. Assim foi feito em ROSSO (1986), que utilizou traçadores fluorescentes para determinar a velocidade média de trânsito.

Outro parâmetro importante, que é necessário se conhecer, é o coeficiente de dispersão, pois possui papel fundamental no comportamento de um poluente lançado em um corpo hídrico. Vários autores propuseram equações empíricas para estimar o coeficiente de dispersão  $e$ , também, reproduzir as variações na concentração de substâncias conservativas e solúveis, a partir das características hidráulicas do rio estudado.

Segundo ROSSO (1986), RIGO (1992) e MACHADO (2006), essas equações propostas foram obtidas para determinadas condições de fluxo e, ainda, levam em consideração os principais parâmetros hidráulicos influentes no valor do coeficiente de dispersão: profundidade média, velocidade média, declividade e largura. Contudo, segundo GIORI (2011) estas equações, apesar de fáceis de utilizar, comprometem o resultado, pois foram desenvolvidas para condições específicas com características de diferentes escoamentos. Então, de acordo com o estudo realizado por ROSSO (1986), os resultados obtidos pelas equações empíricas não foram satisfatórios, pois apresentaram

resultados muito divergentes entre si e em relação aos valores obtidos experimentalmente. Segundo ROSSO (1986), estas variações podem ser devidas, em sua maioria, pela consideração de poucos parâmetros (raio hidráulico, profundidade, velocidade média da seção e velocidade de fricção) e pelas fórmulas serem derivadas a partir da Teoria de Taylor.

Outra maneira de determinar o coeficiente de dispersão longitudinal é a utilização do método de traçadores em experimentos de campo que, segundo RIGO (1992), AMARAL (2007) e RIBEIRO (2007), é o método mais adequado, pois simulam corretamente o movimento e a dispersão do soluto, considerando todas as características hidrodinâmicas e geométricas do escoamento do trecho do rio estudado. Neste caso, os traçadores, que simulam a substância solúvel (no caso, o poluente), são lançados instantaneamente num determinado ponto de seção transversal do escoamento (ponto de injeção), movendo-se para jusante junto ao fluxo da água, inicialmente com uma massa concentrada e, após algum tempo, dispersando-se e sofrendo um aumento de tamanho e um decréscimo na sua concentração. Em duas ou mais seções de monitoramento a jusante deste ponto de injeção são coletadas amostras em intervalos de tempo pré-determinados. Após análises destas amostras, são obtidas as curvas de concentração versus tempo em cada uma destas seções.

A partir destas curvas de concentração, alguns autores propuseram diferentes métodos para determinar o coeficiente de dispersão. Estes métodos foram utilizados e comparados neste trabalho, e se encontram no item 4.2.

### **2.3. TRANSPORTE DIFUSIVO-ADVECTIVO**

Normalmente, utiliza-se um modelo unidimensional para descrever o transporte e a dispersão de uma substância em cursos naturais de água, na forma de uma equação diferencial conhecida como a equação da advecção-dispersão, deduzida a partir de um balanço de massa, onde os fluxos são regidos pela lei de Fick (BARBOSA *et al.*, 2005). De acordo com a lei de Fick, o fluxo de massa de um soluto, para um processo de difusão molecular unidimensional, é proporcional ao gradiente de sua concentração, sendo expresso matematicamente pela equação

$$f = - D_m \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

onde:

$f$  é a densidade de fluxo de massa dissolvida ( $M.L^{-2}.T^{-1}$ );

$D_m$  é o coeficiente de difusão molecular ( $L^2.T^{-1}$ );

$C$  é a concentração da substância diluída ( $M.L^{-3}$ );

$x$  é a direção em que se desenvolve o processo (L).

O sinal negativo da equação indica que o fluxo de massa ocorre no sentido oposto ao do gradiente de concentração, isto é, da região de maior concentração para região de menor concentração.

A lei da conservação de massa, quando aplicada a um volume de controle de largura  $\Delta x$  num fluido em repouso, no qual o transporte de massa é unidimensional na direção  $x$ , a variação temporal de massa do volume de controle corresponde à diferença entre o fluxo de massa que entra (afluxo) e o fluxo de massa que sai (efluxo), acrescido de reações dentro do volume de controle. Sendo assim, chegou-se a equação

$$\frac{\partial C}{\partial t} \Delta x = f \cdot \Delta x - \left( f \cdot \Delta x + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x \right) + \sum R_{p/c} \quad (2)$$

onde:

$\frac{\partial C}{\partial t} \Delta x$  é a variação temporal da massa no interior do volume de controle;

$f \Delta x$  é o fluxo de massa que entra no volume de controle, afluxo;

$f \Delta x + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x$  é o fluxo de massa que sai do volume de controle, efluxo;

$\sum R_{p/c}$  é a taxa de reações de produção e consumo de massa no interior do volume de controle.

Na ausência de reações no interior do volume de controle, temos, de maneira simplificada, a equação

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial f}{\partial x} \quad (3)$$

Combinando-se as equações (1) e (3), temos que a equação da difusão unidimensional é dada por

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_m \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (4)$$

O transporte de massa da substância foi analisado apenas considerando a difusão molecular, que é o responsável pelo espalhamento da substância solúvel no corpo de água. A partir deste ponto, será considerado também o efeito da advecção, que é explicado pelo transporte da massa provocado pelo movimento do fluido. Os processos de advecção e difusão podem ocorrer simultaneamente, podendo seus efeitos serem superpostos.

O fluxo advectivo da massa através de uma unidade de área no plano yz provocada pela componente da velocidade na direção x é expresso por

$$u \cdot C \quad (5)$$

onde:

$u$  é o componente da velocidade do fluido na direção x (L);

$C$  é a concentração da substância ( $M \cdot L^{-3}$ ).

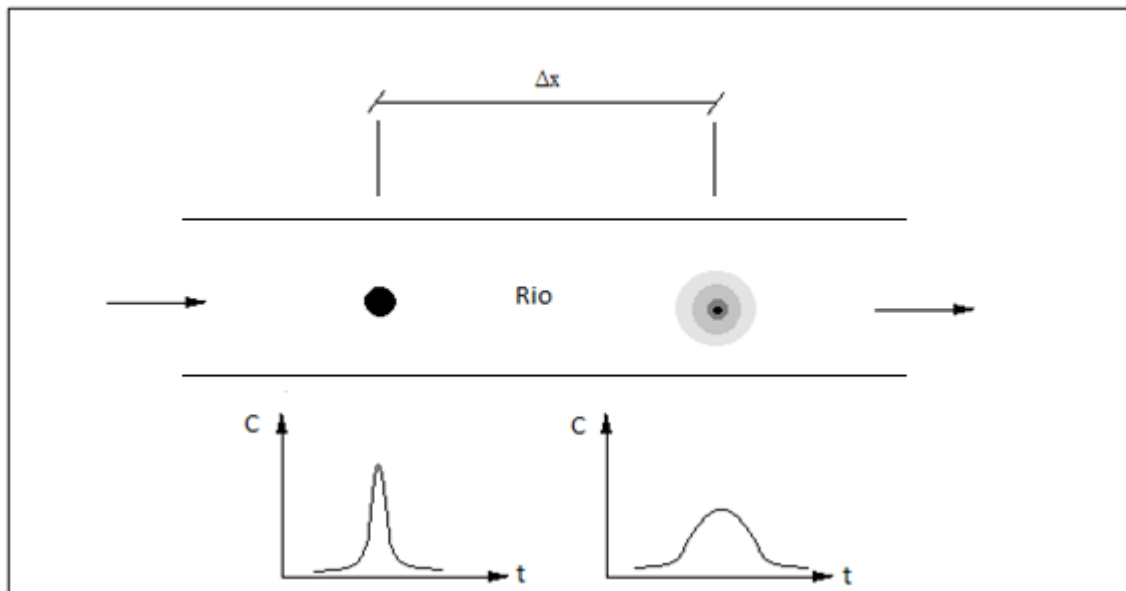
A equação (6) abaixo, expressa a taxa total de transporte de massa em função da soma do termo advectivo com o termo difusivo.

$$f = \underbrace{u \cdot C}_{\text{Termo Advectivo}} + \underbrace{\left( -D_m \frac{\partial C}{\partial x} \right)}_{\text{Termo Difusivo}} \quad (6)$$

Combinando-se as equações (6) e (3), temos a equação de transporte advectivo difusivo considerado apenas na direção x, apresentada abaixo.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot C)}{\partial x} = D_m \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

A **Figura 5** ilustra os efeitos dos processos físicos da difusão e advecção da massa da substância. Como pode ser observado abaixo, o fluxo advectivo provoca o deslocamento  $\Delta x$  da substância ao longo do curso da água. Já o fluxo difusivo é responsável pelo espalhamento da substância no escoamento.



**Figura 5: Efeitos dos processos de advecção e difusão. Fonte: RIBEIRO (2007).**

Neste contexto, em muitos casos, há a predominância de um desses processos físicos, difusão e advecção, que pode ser percebido pelo número de Peclet. O número de Peclet expressa a dominância entre a difusão e advecção (ROLDÃO e PECLY, 2011) na forma

$$P_e = \frac{D_L}{U \cdot x} \quad (8)$$

onde:

$P_e$  é o número de Peclet;

$D_L$  é o coeficiente de dispersão longitudinal ( $L^2.T^{-1}$ );

$U$  é a velocidade média entre o local de injeção e a seção medida ( $L.T^{-1}$ );

$x$  é a distância entre o local de injeção e a seção medida (L).

A partir do cálculo do número de Peclet é possível se saber qual processo físico dominante sobre o movimento da pluma no corpo hídrico, como é mostrado abaixo:

$P_e \gg 1$ , tem-se que a difusão é dominante e a pluma se espalha mais rápido do que se move;

$P_e \ll 1$ , tem-se que a advecção é dominante e a pluma se move mais rápido do que se espalha.

Para uma injeção instantânea de poluentes não degradáveis aplica-se a equação fundamental de transporte advectivo e difusivo (Eq. 7) com as seguintes condições de fronteira, considerando-se a origem do sistema de coordenadas no ponto de lançamento:

$$1. C_I(\infty, t) = 0 \quad x > 0 \quad \forall t > 0 \quad (9)$$

$$2. C_{II}(-\infty, t) = 0 \quad x < 0 \quad \forall t > 0 \quad (10)$$

$$3. C_I(0, t) = C_{II}(0, t) \quad \forall t > 0 \quad (11)$$

$$4. D_L A \left\{ \frac{\partial C_{II}(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial C_I(x,t)}{\partial t} \right\} = M \delta(t) \quad (12)$$

onde:

$M$  é a massa de poluente conservativo lançada instantaneamente.

Com isso, a solução analítica da equação do transporte advectivo e difusivo (em APÊNDICE), para uma massa de substância conservativa lançada pontualmente num corpo hídrico com escoamento permanente uniforme, é dada pelo modelo de Taylor, sendo a equação expressa por

$$C(x, t) = \frac{M}{A \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_L \cdot t}} \exp \left[ \frac{-(x - U \cdot t)^2}{4 \cdot D_L \cdot t} \right] \quad (13)$$

onde:

$C$  é a concentração da substância,  $M.L^{-3}$ ;

$M$  é a massa da substância injetada,  $M$ ;

$A$  é a área da seção transversal do escoamento,  $L^2$ ;

$D_L$  é o coeficiente de dispersão longitudinal,  $L^2.T^{-1}$ ;

$x$  é a distância entre o local de injeção e a seção medida,  $L$ ;

$U$  é a velocidade média entre o local de injeção e a seção medida,  $L.T^{-1}$ .

Desta forma, o modelo de Taylor permite prever a concentração de um poluente lançado acidentalmente ou intencionalmente, em qualquer instante em uma seção transversal a jusante do ponto de lançamento.

Os parâmetros  $M$ ,  $A$ ,  $x$  e  $t$  são conhecidos e de fácil determinação. A velocidade média ( $U$ ) também pode ser obtida com certa facilidade, utilizando como recursos o molinete, o ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) ou a técnica de traçadores.

O parâmetro com maior dificuldade de se obter para utilizar a equação de Taylor é o coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ). Sua determinação pode ser feita de maneira imprecisa, utilizando fórmulas empíricas baseadas em dados hidráulicos de diferentes escoamentos ou, mais precisamente, com o emprego de traçadores.

#### **2.4. MODELAGEM MATEMÁTICA**

Segundo ROSMAN (2012), a modelagem matemática consiste na tradução para a linguagem matemática do modelo conceptual do fenômeno físico de interesse. Quanto melhor e mais completo for o modelo conceptual, mais complexo é o modelo matemático, e menor é a nossa capacidade em obter uma solução geral. De certo modo, os modelos conceptuais empíricos são representados pelos modelos matemáticos, freqüentemente, por equações relativamente fáceis de resolver. Os modelos mais gerais, freqüentemente ao serem traduzidos em modelos matemáticos são escritos em termos de equações diferenciais, que, em sua maioria, não possuem soluções gerais.

Em CHOW (1973) pode-se observar uma gama de referências sobre o surgimento dos modelos matemáticos e também uma ampla abordagem teórica sobre as condições de fluxo em regime permanente e não permanente.

Em uma retrospectiva histórica, CHOW (1973) afirma que as primeiras formulações matemáticas foram utilizadas para modelar um escoamento em condições



de regime permanente e uniforme, por meio das propostas de Chézy em 1769 e por Manning em 1889. Ainda segundo o autor, a evolução do tratamento numérico para o escoamento permanente e gradualmente variado teve seu início no Século XIX, a partir de trabalhos de pesquisa de Bélanger, Saint-Venant, Bernoulli, dentre outros.

CHOW (1973) apresenta a dedução das equações que descrevem o escoamento em regime não permanente e gradualmente variado, publicadas inicialmente por Saint-Venant em 1870. Por convenção o sistema formado pela dedução destas equações é denominado modelagem hidrodinâmica, abrangendo uma gama de situações reais de escoamento em leitos fluviais.

Segundo OLIVEIRA (2005), a modelagem hidrodinâmica não foi utilizada inicialmente, devido à complexidade de resolução das equações diferenciais e derivadas parciais componentes do sistema e, sendo assim, permaneceu sem uso prático até serem desenvolvidos procedimentos gráficos simplificados. Estes procedimentos foram impulsionados durante a II Guerra Mundial, quando americanos e ingleses desenvolveram métodos de análise de rompimento de barragens, que poderiam ser causados por eventuais bombardeios da força aérea alemã.

A modelagem hidrodinâmica passou a ser utilizada, efetivamente, a partir da chegada da computação digital, na década de 60, podendo se atribuir ao *US Army Corps of Engineers* as primeiras utilizações em casos práticos de análise de trânsito de ondas de cheias em calhas fluviais.

Segundo SHONNOR (1996) *apud* PEREIRA (2003), a justificativa para a elaboração de modelos matemáticos na avaliação ambiental pode-se resumir em três razões:

- obter melhor compreensão do transporte e destino de substâncias químicas por meio da quantificação de suas reações;
- compreender a evolução e os movimentos das substâncias;
- determinar possíveis concentrações de exposição química em organismos aquáticos no passado, presente e futuro e prognosticar condições futuras sobre diversos cenários.

Modelos validados, isto é, aferidos com dados de campo e analisados por especialistas, são ferramentas indispensáveis à gestão e ao gerenciamento de sistemas

ambientais, pois permitem: estender o conhecimento para regiões nas quais não há medições; entender processos dinâmicos, ajudando na interpretação de medições feitas em estações pontuais; prever situações simulando cenários para estudos e projetos; mapear áreas de risco; determinar destinos prováveis de contaminantes; definir estratégias de ação caso acidentes com derrames de contaminantes e prever evolução de eventos em tempo real.

A escolha do modelo depende de fatores como o objetivo do estudo, a disponibilidade de dados, as características da bacia e do rio e da experiência do usuário com o modelo.

#### 2.4.1. MODELOS HIDRODINÂMICOS

São conhecidos por modelos hidrodinâmicos aqueles modelos matemáticos que utilizam as equações da continuidade e dinâmicas conhecidas como equação de Saint-Venant. Os modelos hidrodinâmicos são bastante aplicados no estudo de escoamentos de cursos d'água naturais, principalmente na presença de regimes turbulentos e não permanentes (PEREIRA, 2010), dentre outras diversas aplicações. Abaixo estão listadas algumas aplicações já realizadas com modelos hidrodinâmicos.

MIGUEZ (1994) utilizou o MODCEL (modelo de células) em escoamentos bi-dimensionais para representar o escoamento de trechos de rio e de planície de uma bacia hidrográfica, modelando os padrões de movimento das cheias. O modelo foi aplicado a uma sub-bacia do Pantanal Mato-grossense.

ENOMOTO (2004) realizou seu estudo na bacia do rio Palmital, onde buscava métodos para elaboração de mapas de inundação. O modelo de chuva-vazão IPH II foi utilizado para determinar as vazões máximas a partir de chuvas de projeto. A partir dos resultados de vazão obtidos pelo modelo, utilizou-se o HEC-RAS para estimar os níveis de inundação para, enfim, inseri-los no *software* ArcView e elaborar os mapas.

OLIVEIRA (2005) utilizou uma modelagem hidrodinâmica com o objetivo de analisar a propagação de cheias originadas principalmente no rio Bananal, que é controlado por um reservatório hidroelétrico, na bacia do Paraíba do Sul, a fim de verificar os danos causados às comunidades.

CONDE (2007) utilizou o HEC-RAS para definir a evolução do leito do rio Mondego, entre os anos de 1983 e 2003 e comparou os resultados com levantamentos batimétricos e granulométricos e a registros hidrológicos destes 21 anos.

PAULO (2007) analisou diferentes métodos para determinar a vazão ecológica para o rio Araguari, no trecho de vazão reduzida na hidroelétrica de Capim Branco I. Dentre estes métodos, destacou-se a análise pelo Método do Perímetro Molhado. Para a aplicação deste método foi utilizado o modelo computacional HEC-RAS, que simulou a variação da vazão a partir de 37 seções batimétricas.

ROCHA *et al.* (2009) tiveram como objetivo de seu trabalho verificar a região de aplicabilidade do modelo Muskingum-Cunge. Para isto, foram comparados os hidrogramas de saída deste modelo com o HEC-RAS para canais com distintas características físicas, tomando como hipótese que as simulações do HEC-RAS são as que melhor representam a realidade.

CHAGAS (2009) teve como objetivo em seu trabalho simular eventos críticos de vazões para estudo do comportamento hidrodinâmico no baixo curso do Rio São Francisco, utilizando o modelo HEC-RAS, e analisar a disponibilidade hídrica no Perímetro Irrigado de Propriá nos aspectos de quantidade e qualidade da água utilizando o modelo de rede de fluxos AcquaNet.

VERÓL (2010), assim como MIGUEZ (1994), utilizou o MODCEL para simular a ruptura hipotética da barragem de Funil, localizada no rio Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro.

LOU (2010), assim como MIGUEZ (1994) e VERÓL (2010), utilizou o MODCEL com a finalidade de analisar e diagnosticar zonas de inundações na bacia hidrográfica da cidade de Petrópolis, sub-bacia do rio Piabanha.

PAIVA *et al.* (2011) apresentam uma proposta de um modelo hidrodinâmico unidimensional para redes de rios ou canais baseado no esquema numérico preditor-corretor de MacCormack, comparando os resultados da nova proposta de metodologia com os resultados obtidos por meio do HEC-RAS. Os resultados mostraram que o modelo proposto gera resultados idênticos aos obtidos com o HEC-RAS.

PONTES (2011) utilizou modelos de propagação de vazão simplificados a fim de verificar vantagens e desvantagens destes modelos. Para isto, comparou-se os resultados obtidos pelos modelos simplificados com os do modelo hidrodinâmico

completo, o HEC-RAS. Os modelos de propagação de vazão simplificados utilizados foram: modelo não linear de Onda Cinemática; modelo Muskingum-Cunge linear e não linear; modelo Muskingum-Cunge modificado por Todini e o modelo IPHS1.

RIBEIRO e LIMA (2011) utilizaram o modelo computacional HEC-RAS e técnicas de geoprocessamento no SIG ArcGis para identificar áreas de maior risco de inundações na bacia hidrográfica do córrego Humaitá, Juiz de Fora, MG.

#### 2.4.2. MODELOS DE TRANSPORTE

FERNANDES (2001) desenvolveu um modelo matemático de transporte de poluentes em sistemas estuarinos em FORTRAN 95 e o acoplou ao sistema de modelos MOHID 2000 para simular: o transporte na coluna de água das fases dissolvida e particulada do contaminante; a adsorção do poluente aos sedimentos em suspensão e/ou depositados; a deposição e erosão de sedimentos contaminados; dentre outras.

PEREIRA (2003) propõe a utilização de modelos numéricos para simular tanto os processos de transporte como os processos químicos que ocorrem num corpo hídrico. Com isso, o objetivo de seu estudo foi avaliar os processos que determinam a qualidade das águas da Lagoa dos Patos, utilizando o modelo Delf3D da WL | Delft Hydraulics.

CUNHA e DIAS (2006) desenvolveram um modelo unidimensional de transporte, como parte de um sistema para minimização de danos ambientais e rios, aplicando a escalares passivos e não conservativos. Este modelo foi aplicado na simulação do transporte em um rio dentro de uma bacia hidrográfica hipotética, mostrando, assim, a sua aplicabilidade do sistema na minimização de danos ambientais em rios provocados por acidentes.

VICENTE (2008) apresenta um modelo computacional de transporte, denominado ADOIL, desenvolvido para estudar a advecção e difusão de uma mancha de óleo derramada num corpo hídrico assim como os efeitos que esta sofre devido aos processos de espalhamento e evaporação. O modelo desenvolvido foi baseado na equação bidimensional de advecção-difusão, sendo discretizada em sua forma semi-implícita pelo método numérico *Alternating-Direction Implicit* (ADI).

AMARAL (2009) e GIORI (2011) utilizaram um modelo analítico unidimensional, calibrado com os dados relativos às características de transporte e

dispersão obtidos por meio de ensaios com traçadores fluorescentes, para simular o transporte de poluentes solúveis, podendo assim, prever as conseqüências de um despejo acidental de poluentes num trecho do rio Paraíba do Sul, entre Volta Redonda e Barra do Piraí e no rio Guandu, respectivamente, ambos localizados no estado do Rio de Janeiro.

PEREIRA (2010), em seu estudo, desenvolveu um modelo hidrodinâmico e de transporte de poluentes bidimensional de grade não estruturada para estudar corpos hídricos rasos. O modelo foi desenvolvido em dois módulos: hidrodinâmico e de transporte de massa. O módulo de transporte de massa, por sua vez, representa o transporte de um escalar conservativo sob influência dos processos físicos do meio. Este modelo foi aplicado num estudo de caso simplificado formado por uma lagoa circular e no rio Guaíba – Porto Alegre.

BARBOSA (2012) utilizou o modelo computacional 3D SisBaHiA com o suporte de técnicas de interpretação de imagens de satélite e de campanhas de campo com o uso de traçadores fluorescentes para avaliar o campo de diluição do emissário submarino industrial da empresa Fibria S.A., localizada no estado do Espírito Santo.

### **3. METODOLOGIA**

Este capítulo tem como objetivo descrever a metodologia empregada neste estudo com o uso de traçadores fluorescentes para avaliar as características de transporte e dispersão do rio Piabanha, bem como a metodologia utilizada na modelagem hidrodinâmica, com o modelo numérico HEC-RAS, e de transporte, com o modelo analítico de Taylor.

#### **3.1. ENSAIO COM TRAÇADORES**

A técnica de traçadores possui grande aplicabilidade em hidrologia, como: medições de vazão líquida, avaliação da capacidade de diluição de um poluente solúvel, determinação dos coeficientes de dispersão, dentre outras, conforme apresentado no subitem 3.1.8. Neste trabalho, essa técnica é utilizada para determinar parâmetros de transporte e dispersão, por meio de ensaios *in situ*, cuja finalidade é de auxiliar o

planejamento de ações e minimizar problemas ocasionados por despejos acidentais de poluentes.

Para assegurar um bom ensaio de campo devem ser realizados os seguintes procedimentos.

### 3.1.1. CONDIÇÕES DE APLICABILIDADE DA TÉCNICA DE TRAÇADORES FLUORESCENTES

Primeiramente, devem ser consideradas algumas hipóteses para que o estudo com o uso de traçadores ocorra de forma esperada, fornecendo, assim, resultados satisfatórios para a análise de alguns parâmetros como: a velocidade média, tempo de trânsito, coeficiente de dispersão e a vazão. Neste contexto, deve-se certificar que a condição de regime permanente seja satisfeita, tendo em vista que a determinação destes parâmetros hidráulicos é realizada por meio da equação de balanço de massa.

Neste trabalho, o traçador é utilizado para simular um poluente solúvel e conservativo, logo, ele deve se comportar exatamente como o material que se quer estudar se mantendo conservativo por todo o trecho estudado, isto é, sem interagir com o meio ou modificar suas características durante o experimento, devendo ser facilmente detectável. Neste contexto, em casos de aplicações em hidrologia, como é o caso deste trabalho, espera-se que o traçador se comporte exatamente como a água, deslocando-se junto a ela, sem alterar as condições do escoamento e/ou a natureza do fluído estudado.

Deve-se certificar também a inexistência de contribuições laterais e de fontes de drenagem, pois estes fatores interferem e muito na validação da determinação da vazão pelo método da utilização de traçadores fluorescentes. Ainda neste contexto, deve-se verificar se houve mistura completa do traçador fluorescente com o rio, pois a partir disto, se torna possível a determinação dos parâmetros hidráulicos para os trechos estudados.

### 3.1.2. VISITA PRÉVIA AO LOCAL DE ESTUDO

O conhecimento prévio da área de estudo é um passo importantíssimo para a escolha de locais seguros e com boas condições de coleta de amostras e injeção de traçadores. A escolha destes locais deve ser realizada a partir de levantamentos de dados

e informações disponíveis e de visitas prévias ao local de estudo, que sevem para identificar, registrar e mapear locais candidatos à coleta de amostras e injeção de traçadores. Após identificação de cada ponto candidato ao ensaio com traçadores fluorescentes é realizado um registro com fotos e planilhas descrevendo as principais características morfológicas e de segurança do local em estudo. Feito isto, utiliza-se o GPS de mão para mapear a localização destes pontos. De posse de todas estas informações, realiza-se a escolha dos pontos de coleta de amostras e de injeção de traçadores.

A visita prévia serve também para coletar amostras de água do corpo hídrico no local de estudo, para serem realizados testes que facilitem na escolha do traçador fluorescente a ser empregado no ensaio de campo.

### 3.1.3. PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Para um ensaio de campo bem sucedido, o pré-dimensionamento do estudo experimental se torna extremamente necessário, pois ele está diretamente relacionado com a otimização de fatores que estão intimamente ligados com a precisão, os custos e a segurança da equipe e dos equipamentos envolvidos.

O pré-dimensionamento é baseado, principalmente, nos parâmetros do escoamento, que devem ser estimados ou obtidos de estudos já realizados no local ou de órgãos gestores da área de interesse.

A partir destas informações preliminares, como: vazão e velocidade do rio; verificação de presença de matéria orgânica no rio; locais possíveis para realização da injeção e de coleta de traçadores; informações relatadas por moradores; informações a respeito de barragens presentes nos trechos do estudo, entre outras. Para ajudar na escolha dos locais de injeção e de monitoramento, foi utilizado ainda o *Google Earth*, que permite determinar a distância aproximada entre as seções do estudo. Para escolha das seções a serem estudadas, além das informações acima relatadas, também foram definidos detalhes de segurança e logística, tais como: locais seguros para os equipamentos e equipe envolvida, para pernoite e alimentação, para facilidade no acesso, entre outros. De posse destes dados, simula-se o ensaio utilizando-se, por exemplo, uma solução analítica da equação de dispersão unidimensional, neste caso, a equação de Taylor, arbitrando-se valores para o coeficiente de dispersão longitudinal e

da velocidade média de trânsito para cada trecho do rio a ser estudado. Esta simulação visa fornecer dados que permitam avaliar qual a massa de traçador que será injetada e quanto tempo o traçador levará para chegar e passar pela seção de monitoramento, fornecendo assim, a hora em que cada equipe deve chegar em sua seção e quanto tempo deve permanecer coletando amostras. O conhecimento deste tempo é indispensável para que se possa dimensionar o número de equipes e a movimentação das equipes e dos equipamentos entre as seções.

#### 3.1.4. SELEÇÃO DE TRAÇADORES

Feita a caracterização e delimitação da área de estudo, faz-se a escolha dos traçadores a serem utilizados, pois segundo RIGO (1992), a escolha deve ser feita diferentemente para cada local a ser estudado, pois como existem diferentes tipos de traçadores, deve se olhar para suas especificações e verificar se para o caso estudado ele atenderá relativamente bem ao esperado. Para isso, testes com as amostras de água coletadas na visita prévia ao local de estudo devem ser realizados com os traçadores fluorescentes, a fim de verificar a adequação dos traçadores no ensaio de campo.

Em geral, utilizam-se dois tipos de traçadores fluorescentes em estudo como este para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios de campo. De acordo com ROLDÃO e PECLY (2011), dois traçadores fluorescentes fáceis e baratos de serem encontrados no mercado são a Uranina e a Amidorodamina G, com a ressalva que a Amidorodamina G é encontrada apenas em mercado internacional, sendo assim necessária a importação da mesma.

#### 3.1.5. CAMPANHAS DE CAMPO

Depois de realizado o pré-dimensionamento da campanha, é necessário preparar o material a ser utilizado no estudo de campo. O preparo deste material é indispensável, pois sem ele não é possível a realização do ensaio de campo.

A campanha de campo se inicia na injeção da solução de traçador, que é realizada na primeira seção do trecho em estudo de forma instantânea, simplesmente lançando a solução no rio. Esta solução é composta de traçadores em pó diluídos em água.



Após a injeção, as equipes de monitoramento designadas a realizar coletas de amostras a jusante devem estar prontas, no horário estipulado no pré-dimensionamento, para darem início às coletas das amostras de água, que são feitas em intervalos de tempo regulares, anotando-se o horário de cada coleta, tendo ainda como ajuda outra equipe de posse do fluorímetro de campo, que verifica a ausência ou presença do traçador nas amostras, podendo assim detectar o início e o fim da passagem da nuvem de traçador. Para que a curva de passagem fique bem definida, normalmente são coletadas aproximadamente 50 amostras em cada seção de monitoramento. Nas seções mais próximas ao ponto de injeção dos traçadores fluorescentes normalmente são coletadas 100 amostras, sendo estas coletadas em duas verticais, que servem para verificar a ocorrência da DBM e a adequação para determinar a vazão do escoamento. A escolha de duas verticais, em detrimento de maior número, deve-se à observação, durante a visita de campo, de alta turbulência e existência de contribuições laterais significativas. As amostras são acondicionadas em recipientes de polietileno escuro para se evitar a fotodecomposição, são preservadas com a adição de um bactericida para prevenir a biodegradação e são devidamente guardadas e identificadas.

### 3.1.6. ANÁLISE DAS AMOSTRAS

A análise das amostras coletadas em campo é feita, em laboratório, por meio de um aparelho chamado espectrofluorímetro, que possui monocromadores, de excitação e emissão, que permite emitir luz em uma determinada banda estreita de comprimentos de onda na amostra e é capaz de ler a resposta, isto é, a intensidade de fluorescência emitida pela amostra, também em uma selecionada banda estreita de comprimentos de onda. A utilização simultânea de dois tipos de traçadores não compromete o experimento, quando os traçadores escolhidos possuem características diferentes, e quando excitados apresentam respostas de fluorescência em diferentes comprimentos de onda, logo são facilmente identificados.

Para validar os dados obtidos a partir das análises laboratoriais das amostras devem-se levar em consideração as hipóteses descritas no subitem 3.1.1.

### 3.1.7. ANÁLISE DOS DADOS

Após realizar as leituras de intensidade de fluorescência das amostras coletadas em cada seção, é utilizada uma reta de calibração que possibilita a transformação desta intensidade em concentração, sendo assim possível identificar as curvas de passagem da nuvem de traçadores fluorescentes pelas seções de monitoramento. A análise das curvas de passagem é feita com a finalidade de determinar o tempo de trânsito, que se refere ao movimento longitudinal ao longo do tempo da água e dos constituintes dissolvidos de um ponto ao outro no escoamento, a velocidade média e o coeficiente de dispersão.

É também possível verificar a adequação para determinar a vazão, contudo é necessário garantir a mistura lateral/transversal completa da substância solúvel com o corpo hídrico. Para isto, normalmente são realizadas coletas de amostras em duas verticais nas seções mais próximas ao ponto de injeção, como explicado no subitem 3.1.5.

### 3.1.8. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO ESCOAMENTO

Neste subitem é apresentada uma formulação utilizada para verificar a DBM, determinar a vazão, o tempo de trânsito, a velocidade média e o coeficiente de dispersão com o uso da técnica de traçadores fluorescentes.

- DISTÂNCIA DE BOA MISTURA (DBM)

Diversos autores apresentaram fórmulas empíricas para o cálculo da DBM, contudo, estas fórmulas não apresentam resultados precisos, e sim informações apenas indicativas, para o caso de aplicações em rios.

WARD (1973) *apud* ROSSO (1986) propôs a seguinte fórmula empírica para o cálculo da DBM

$$DBM = k \frac{W^2}{0,02h} \quad (14)$$

onde:

$k$  é igual a 0,08 para injeção central e 0,22 para injeção 10% fora do centro;

$W$  é a largura média, L;

$h$  é a profundidade média, L.

YOTSUKURA (1973) *apud* ROSSO (1976) propôs a seguinte equação para injeção instantânea

$$DBM = 1,3 \frac{U \cdot W^2}{h} \quad (15)$$

onde:

$W$  é a largura média, L;

$U$  é a velocidade média, L;

$h$  é a profundidade média, L.

FISCHER *et al.* (1979) *apud* ROLDÃO e PECLY (2011) propôs a seguinte equação, que é válida para injeção central

$$DBM = 0,1 W^2 \frac{U}{D_t} \quad (16)$$

sendo

$$D_t = a \cdot h \cdot u_* \quad (17)$$

onde:

$W$  é a largura média, L;

$U$  é a velocidade média, L;

$a$  é o coeficiente que está contido entre 0,4 e 0,8;

$h$  é a profundidade média, L;

$u_*$  é a velocidade média de atrito,  $L.T^{-1}$ .

RIMAR *apud* ROSSO (1976) propôs

$$DBM > 0,13U_{Chezy} \frac{W^2}{h} \quad (18)$$

sendo

$$U_{Chezy} = \frac{c^*(0,7c^* + 6)}{9,81} \quad (19)$$

onde:

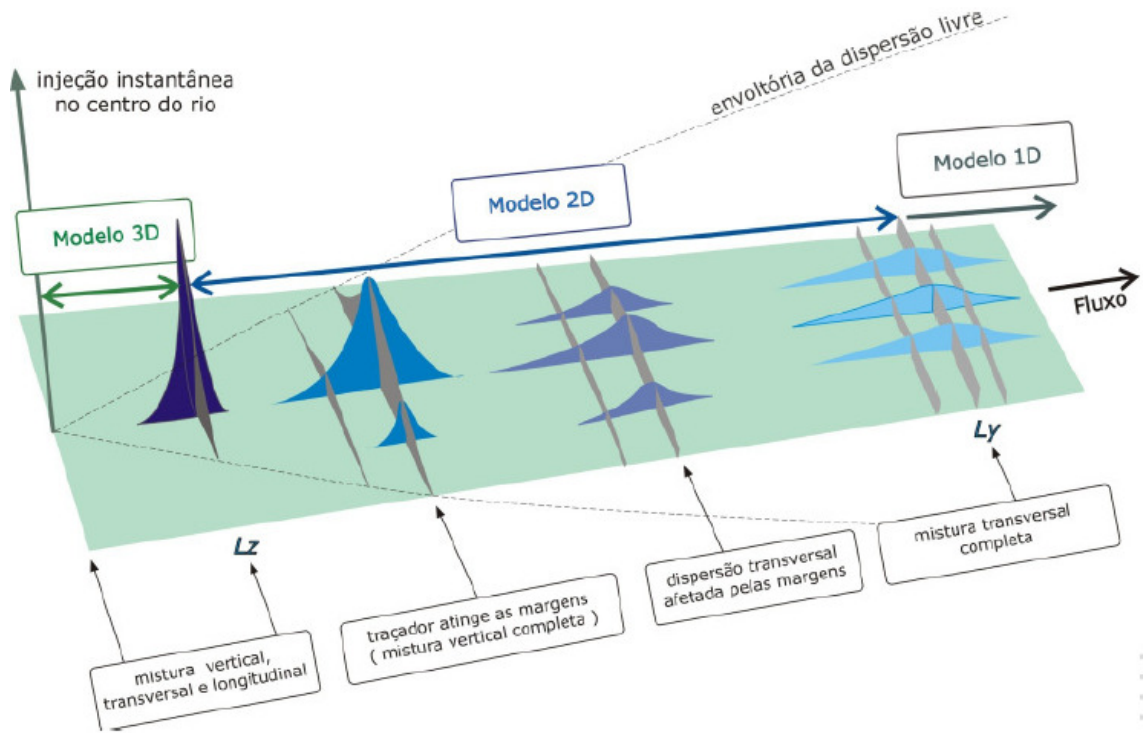
$c^*$  é o coeficiente de Chézy,  $15 < c^* < 20$ ;

$W$  é a largura média, L;

$h$  é a profundidade média, L.

Neste trabalho, além de estimar a DBM pelas fórmulas empíricas apresentadas acima, a avaliação da mistura transversal é feita a partir de análises das amostras coletadas a jusante do ponto de injeção de traçadores fluorescentes, nas duas seções de monitoramento mais próximas, em ambas as campanhas. A coleta se dá em duas diferentes verticais, de maneira simultânea, sendo cada uma delas próxima a uma das margens do rio. Com os dados obtidos após as análises das amostras no laboratório, pode-se determinar as áreas das curvas de concentração versus tempo obtidas, e compará-las, tornando assim possível concluir se a DBM foi alcançada.

A **Figura 6** é uma representação esquemática do processo de diluição do poluente com a água do escoamento, após uma injeção instantânea, até atingir a DBM.



**Figura 6: Representação esquemática do processo de mistura em rios e da distância de boa mistura.**  
**Fonte: ROLDÃO e PECLY (2011), adaptado de HUBBARD *et al.* (1982).**

- **VAZÃO DO ESCOAMENTO (Q)**

A vazão é um parâmetro hidráulico que pode ser determinado pelo uso de traçadores em experimentos de campo, mas para isso é necessário garantir a mistura lateral completa do traçador com o corpo hídrico, pois caso não seja atendida esta situação, torna-se imprópria a estimativa da mesma. A determinação da vazão pode ser feita por três métodos diferentes descritos a seguir.

1. A partir do tempo de trânsito: Para utilização deste método é necessário que a área da seção seja conhecida ou uniforme, a velocidade deve ser obtida a partir dos centróides de duas curvas de passagem de diferentes seções. A aplicabilidade depende de uma distância ótima, que garante o alcance da DBM (Distância de Boa Mistura) e está associada a um tempo  $T_D$  (tempo referente à passagem do início ao final da nuvem de traçador pela seção de monitoramento) que torne viável a amostragem de toda a curva de passagem. Assim

$$Q = A.U \quad (20)$$

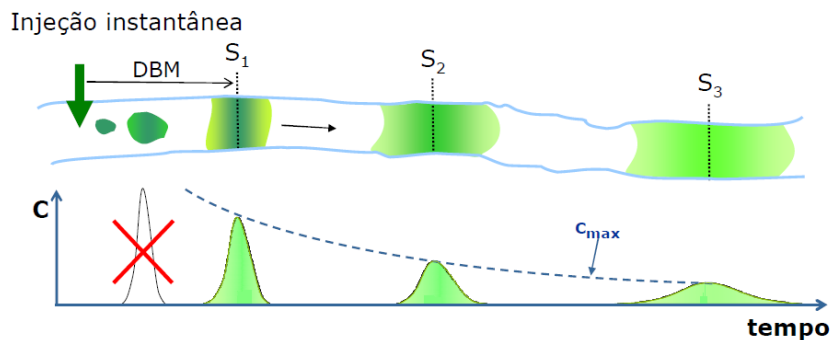
onde:

$Q$  é a vazão líquida,  $L^3.T^{-1}$ ;

$A$  é a área da seção,  $L^2$ ;

$U$  é a velocidade média,  $L.T^{-1}$ .

2. A partir da curva de passagem: A aplicabilidade deste método também depende de uma distância ótima. A seguir, a **Figura 7** apresenta um esboço de como se determina a vazão líquida por este método:



**Figura 7:** Esboço das condições necessárias para o cálculo da vazão líquida. Fonte: ROLDÃO e PECLY (2011).

Neste caso, a vazão é calculada pela seguinte equação

$$Q = \frac{M}{\int_0^{T_D} C(t) dt} \quad (21)$$

onde:

$Q$  é a vazão líquida,  $L^3.T^{-1}$ ;

$M$  é a massa de traçador injetada,  $M$ ;

$C$  é a concentração do traçador,  $M.L^{-3}$ .

3. A partir do balanço de massa: Assim como os métodos anteriores, para aplicar este método é necessário garantir a DBM. Diferentemente dos outros dois métodos, este é utilizado apenas em situações de injeção contínua de traçadores fluorescentes. A **Figura 8** apresenta um esboço das condições necessárias para determinar a vazão líquida por este método.

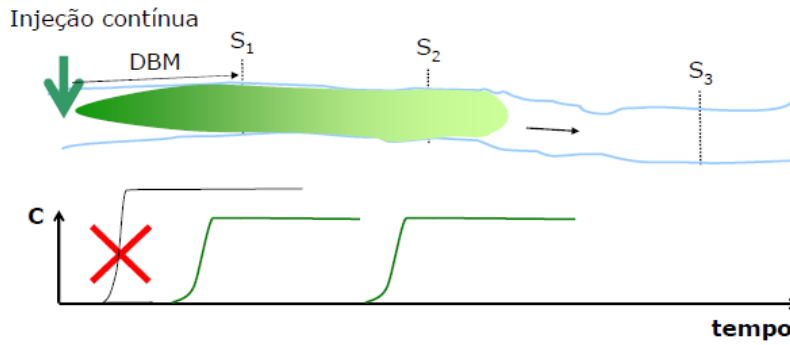


Figura 8: Esboço das condições necessárias para o cálculo da vazão líquida. Fonte: ROLDÃO e PECLY (2011).

Este método leva em consideração a seguinte equação para calcular a vazão líquida do escoamento

$$Q = \frac{C_i}{C_e - C_0} q_i \quad (22)$$

onde:

$Q$  é a vazão líquida,  $L^3.T^{-1}$ ;

$C_i$  é a concentração do traçador na injeção contínua,  $M.L^{-3}$ ;

$C_e$  é a concentração do traçador no efluente,  $M.L^{-3}$ ;

$C_0$  é a concentração do escoamento (*Background*),  $M.L^{-3}$ ;

$q_i$  é a vazão líquida da bomba de injeção contínua,  $L^3.T^{-1}$ .

Estes três métodos apresentados acima podem ser utilizados para cálculo da vazão. Contudo, o primeiro método não é muito utilizado, devido à grande dificuldade de se encontrar na natureza rios com seções transversais uniformes. O terceiro método é utilizado em experimentos com pequenas extensões, devido ao tempo e ao custo associado a uma injeção contínua de traçador. Com isso, o segundo método é o mais indicado para determinar a vazão neste estudo.

- TEMPO DE TRÂNSITO ( $\bar{t}$ )

O tempo de trânsito é definido pela diferença entre os tempos associados aos centróides das duas curvas de distribuição temporal observadas nas seções de monitoramento. O tempo de trânsito é calculado pela equação

$$\bar{t} = \frac{\int t \cdot C(t) \cdot dt}{\int C(t) \cdot dt} \quad (23)$$

- VELOCIDADE MÉDIA ( $U$ )

A velocidade média de cada trecho estudado é outro parâmetro que pode ser facilmente determinado pelo método de traçadores, pois como visto no subitem 2.2.3, a velocidade média é calculada a partir da divisão da distância, compreendida entre as seções de monitoramento, a jusante do ponto de injeção, pelo tempo de trânsito. A equação abaixo descreve o cálculo da velocidade média

$$U = \frac{x}{\bar{t}} \quad (24)$$

onde:

$U$  é a velocidade média,  $L \cdot T^{-1}$ ;

$x$  é a distância entre as seções de monitoramento,  $L$ ;

$\bar{t}$  é a diferença entre os tempos associados aos centróides das duas curvas de distribuição temporal,  $T$ .

- COEFICIENTE DE DISPERSÃO LONGITUDINAL ( $D_L$ )

Além de ser determinado por métodos experimentais, existe uma gama de autores que propõem estimar o coeficiente de dispersão por equações empíricas. Estas equações reproduzem as variações na concentração de materiais conservativos e estimativas do coeficiente de dispersão. Tais equações empíricas foram obtidas para determinadas condições de fluxo e seções características levando em consideração os principais parâmetros hidráulicos: forma da seção transversal, velocidade e



profundidade média, que são de fácil obtenção, mas são grandes influentes no valor do coeficiente de dispersão.

Como foi dito no parágrafo acima, o coeficiente de dispersão pode ser determinado experimentalmente com o uso de traçadores. Este método de determinação apresenta resultados melhores do que os calculados por fórmulas empíricas, tendo em vista que os traçadores quando lançados em corpos hídricos, se misturam com facilidade e, assim, conseguem simular as características do mesmo. O uso da técnica de traçadores torna possível a obtenção das curvas de concentração versus tempo de cada trecho estudado, e, baseando-se nestas curvas, alguns autores propuseram métodos diferentes para determinar o coeficiente de dispersão. Alguns destes métodos foram utilizados neste trabalho para o cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal, e estão apresentados a seguir. Além destes métodos experimentais, utilizou-se também o método do ajuste da curva de concentração versus tempo pela equação de Taylor para obtenção do coeficiente de dispersão.

#### 1. Método de Taylor:

Partindo da equação (13), TAYLOR (1954) determina o coeficiente de dispersão de maneira simplificada, com o auxílio de experimentos realizados em tubulações com regime permanente, usando

$$D_L = \frac{U^3 \cdot t_{1/2}^2}{4 \cdot x \cdot \ln 2} \quad (25)$$

onde:

$U$  é a velocidade média,  $L.T^{-1}$ ;

$2t_{1/2}$  é o intervalo de tempo no qual a concentração é maior do que a metade da concentração máxima, T;

$x$  é a distância do ponto de injeção do traçador à seção de monitoramento, L.

#### 2. Método de Levenspiel e Smith

LEVENSPIEL e SMITH (1957) chegaram a uma análise adimensional para o cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ), a partir da realização de diversos experimentos em tubulações. Com isso, observaram que, se a vazão e o

grau de mistura independem da posição radial, a nuvem do traçador irá se mover com uma velocidade média igual a

$$U = \frac{Q \cdot x}{V} \quad (26)$$

onde:

$Q$  é a vazão,  $L^3.T^{-1}$ ;

$x$  é a distância entre o ponto de injeção do traçador e a seção de monitoramento,  $L$ ;

$V$  é o volume de água na tubulação entre as seções,  $L^3$ .

Sua localização em um tempo  $t$  é representada pela equação

$$x = U \cdot t \quad (27)$$

Substituindo as Equações (25) e (26) na Equação (13), encontra-se

$$\frac{C \cdot V}{M} = \frac{1}{\left(4 \cdot \pi \frac{Q \cdot t \cdot D_L}{V \cdot U \cdot x}\right)^{1/2}} \cdot \exp \left[ \frac{-\left(\frac{1-Q \cdot t}{V}\right)^2}{4 \frac{Q \cdot t \cdot D_L}{V \cdot U \cdot x}} \right] \quad (28)$$

Após considerar que para valores muito pequenos de  $(D_L/U \cdot x)$  a curva se aproxima de uma curva normal, Levenspiel e Smith obtiveram a seguinte equação para calcular o valor do  $D_L$ .

$$D_L = \frac{U \cdot x}{8} \left( (8 \cdot \sigma^2 + 1)^{1/2} - 1 \right) \quad (29)$$

onde:

$\sigma^2$  é a variância reduzida da curva de concentração.

A variância ( $\sigma^2$ ) pode ser calculada da seguinte forma

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_t^2}{\left(\frac{V}{Q}\right)^2} = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} \quad (30)$$

onde:

$\bar{t}$  é o tempo associado ao centro de gravidade da curva ou tempo médio de passagem da nuvem de traçador, T;

$\sigma_t^2$  é a variância em relação a t, T<sup>2</sup>.

A variância temporal da distribuição de traçador pode ser calculada pela equação

$$\sigma_t^2 = \frac{\int (t - \bar{t})^2 \cdot C(t) \cdot dt}{\int C(t) \cdot dt} \quad (31)$$

### 3. Método de Parker

PARKER (1963) *apud* ROSSO (1986) relacionou o  $D_L$  com apenas uma curva de distribuição, ou seja, considerou cada seção separadamente, obtendo assim a seguinte relação para o coeficiente de dispersão longitudinal

$$D_L = \frac{U \cdot \sigma_t^2}{2\bar{t}} \quad (32)$$

### 4. Método de Fisher

Partindo do princípio que a distribuição completa de concentração é observada por um observador móvel, FISHER (1967) *apud* ROSSO (1986) chegou a equação

$$D_L = \frac{U \cdot (\sigma_{t_i}^2 - \sigma_{t_{i-1}}^2)}{2(\bar{t}_i - \bar{t}_{i-1})} \quad (33)$$

Onde  $\sigma_{t_i}^2$ ,  $\sigma_{t_{i-1}}^2$  e  $\bar{t}_i$ ,  $\bar{t}_{i-1}$  são as variâncias temporais da distribuição de traçador e os tempos médios de trânsito de passagem da nuvem de traçador em dois postos consecutivos, respectivamente.

## 5. Método de Krenkel

KRENKEL (1967) *apud* ROSSO (1986) mostrou que quando a curva de concentração versus tempo atinge o valor máximo de concentração, o valor da subtração entre  $x$  e  $U \cdot t$  na equação de Taylor (Equação 13), deve ser zero. Com isso, as concentrações de pico de duas seções quaisquer de monitoramento a jusante do ponto de injeção podem ser comparadas, obtendo, assim, as equações

$$C_{max_1} = \frac{M}{A(4 \cdot \pi \cdot D_L \cdot t_{max_1})^{1/2}} \quad (34)$$

$$C_{max_2} = \frac{M}{A(4 \cdot \pi \cdot D_L \cdot t_{max_2})^{1/2}} \quad (35)$$

Elevando ao quadrado as duas expressões e subtraindo a Equação (33) da (34), temos

$$C_{max_1}^2 - C_{max_2}^2 = \frac{M^2}{A^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot D_L \cdot t_{max_1}} - \frac{M^2}{A^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot D_L \cdot t_{max_2}} \quad (36)$$

Ajustando a equação acima, chegamos à seguinte equação para o cálculo do  $D_L$

$$D_L = \frac{M^2}{A^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot (C_{max_1}^2 - C_{max_2}^2)} - \frac{t_{max_2} - t_{max_1}}{t_{max_1} \cdot t_{max_2}} \quad (37)$$

onde:

$C_{max_1}$ ,  $C_{max_2}$  são as concentrações máximas da substância nas seções,  $M.L^{-3}$ ;

$M$  é a massa da substância injetada,  $M$ ;

$A$  é a área da seção transversal do escoamento,  $L^2$ ;

$t_{max_1}$ ,  $t_{max_2}$  são os instantes em que a concentração é máxima nas seções,  $T$ .

## 6. Método de Ribeiro *et al.*

RIBEIRO *et al.* (2010) desenvolveu um equação empírica para estimar o coeficiente de dispersão  $D_L$  em rios naturais de médio porte com vazões

compreendidas entre 19,57 e 48,54 m<sup>3</sup>/s, levando em consideração os principais fatores que o influenciam, chegando a seguinte equação

$$D_L = 7,326. (u^*)^{0,303}. (h)^{1,316}. (B)^{0,445}. (U)^{1,458} \quad (38)$$

onde:

$u^*$  é a velocidade de cisalhamento, L.T<sup>-1</sup>;

$h$  é profundidade média do canal, L;

$B$  é a largura média do canal, L;

$U$  é a velocidade média, L.T<sup>-1</sup>.

### 3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática consiste na simulação das condições de escoamento, baseada na formulação e solução de relações matemáticas, que expressam os princípios físicos que regem tal fenômeno estudado. Esta modelagem pode ser feita de diferentes formas, dependendo do tipo de estudo que está sendo realizado e da abordagem utilizada.

O modelo é utilizado também com o âmbito de gerar cenários de alteração antrópica e para predição de impactos antrópicos de poluentes no sistema em estudo.

Antes de se escolher um modelo matemático adequado para determinado estudo, deve-se realizar uma análise crítica com relação à sua aplicabilidade e limitações. Se aplicado adequadamente, este deverá prever corretamente o comportamento do local de estudo, isto é, os principais fenômenos de interesse.

#### 3.2.1. MODELOS HIDRODINÂMICOS

Modelos hidrodinâmicos utilizam as leis físicas da mecânica dos fluidos que regem o comportamento de um determinado escoamento de água.

A representação correta da realidade física do escoamento por meio do modelo é, segundo MIGUEZ (1994), função de dois níveis do processo de construção do

mesmo, chamados de discretização topológica e de discretização hidráulica. A discretização topológica diz respeito à forma de representação da natureza do escoamento. A discretização hidráulica refere-se aos detalhes que envolvem as descrições topográficas e hidráulicas dos elementos do modelo.

A discretização topológica tem seu início na definição do tipo do modelo a ser utilizado no escoamento, podendo ser uni, bi ou tri-dimensional. Os modelos unidimensionais consideram o sentido do escoamento em apenas uma direção ao longo de um canal, e fazem uso das equações da continuidade e dinâmicas, mais conhecidas como equações de Saint-Venant. Os modelos bi-dimensionais não consideram uma direção preferencial para o escoamento. Segundo MIGUEZ (1994), a modelagem bi-dimensional pode ser realizada por meio das equações de Navier-Stokes, integradas na vertical, ou pode-se considerar uma malha complexa de células, definidas em função da topografia do local do estudo, levando em consideração as leis de troca de vazão entre as mesmas, no plano do escoamento. Segundo ROSMAN (2012), as equações de Navier-Stokes, que representam o princípio da conservação da quantidade de movimento, em conjunto com a equação da continuidade, a equação de estado e a equação de transporte para cada constituinte da equação de estado compõem o modelo matemático tri-dimensional para qualquer corpo d'água.

Contudo, os modelos unidimensionais são usados com maior frequência que os bi-dimensionais por vários motivos, dentre os quais, o fato de grande parte dos rios seguirem uma direção principal e por os modelos bi-dimensionais serem mais complexos e de difícil utilização. A maior parte dos resultados obtidos dos modelos unidimensionais não difere seriamente da realidade, embora os mesmos não possam reproduzir com clareza detalhes locais mais complicados do escoamento.

Neste estudo, considerou-se utilizar um modelo hidrodinâmico unidimensional para simular o escoamento da calha principal do rio Piabanha, tendo em vista que seu escoamento pode ser representado em apenas uma direção. Para tanto, foi utilizado o *software* HEC-RAS 4.1 (*Hydrologic Engineers Center - River Analysis System*), que será melhor descrito no subitem 3.3.1.1.

### 3.2.1.1. FORMULAÇÃO USADA PELO HEC-RAS 4.1

O HEC-RAS 4.1 foi desenvolvido por *U. S. Army Corps of Engineers (USACE)*, em janeiro de 2010, é gratuito e de fácil obtenção. Este modelo computacional é unidimensional, e possibilita o cálculo e análise hidráulica de escoamentos em canais naturais ou artificiais em regime permanente e não permanente. Ainda por meio deste programa computacional é possível a realização de modelagens de transporte de sedimentos e de qualidade de água.

A modelagem do fluxo de regime permanente é destinada a calcular os perfis da superfície da água para o fluxo constante. O local estudado por este módulo pode ser um trecho único de um rio, um sistema dendrítico ou um rede completa de canais. O componente do fluxo estacionário é capaz de modelar regimes subcríticos, supercríticos ou mistos de perfis de superfície da água.

O procedimento computacional básico para o regime permanente é baseado na solução da equação unidimensional de energia. As perdas de energia são avaliadas por fricção (equação de Manning) e por contração/expansão (coeficiente multiplicado pela mudança da velocidade na linha d'água). A equação de momento é utilizada em situações em que há variações rápidas do perfil da superfície da água. Para estas situações, é utilizada a modelagem do fluxo em regime misto.

O *software* permite também considerar em seus cálculos o efeito de várias obstruções ao fluxo principal do escoamento como pontes, bueiros, represas, dentre outras.

Os níveis de superfície da água são calculados a partir de uma seção transversal para a seguinte por meio da resolução da equação de energia por um procedimento iterativo denominado de *Standart Step Method* (CHOW, 1973). A equação de energia é escrita da seguinte forma

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (39)$$

onde:

$Z_2, Z_1$  são as elevações do fundo da calha principal, L;

$V_2, V_1$  são as velocidades médias (calculado pela divisão entre a descarga total e a área total de fluxo),  $L.T^{-1}$ ;

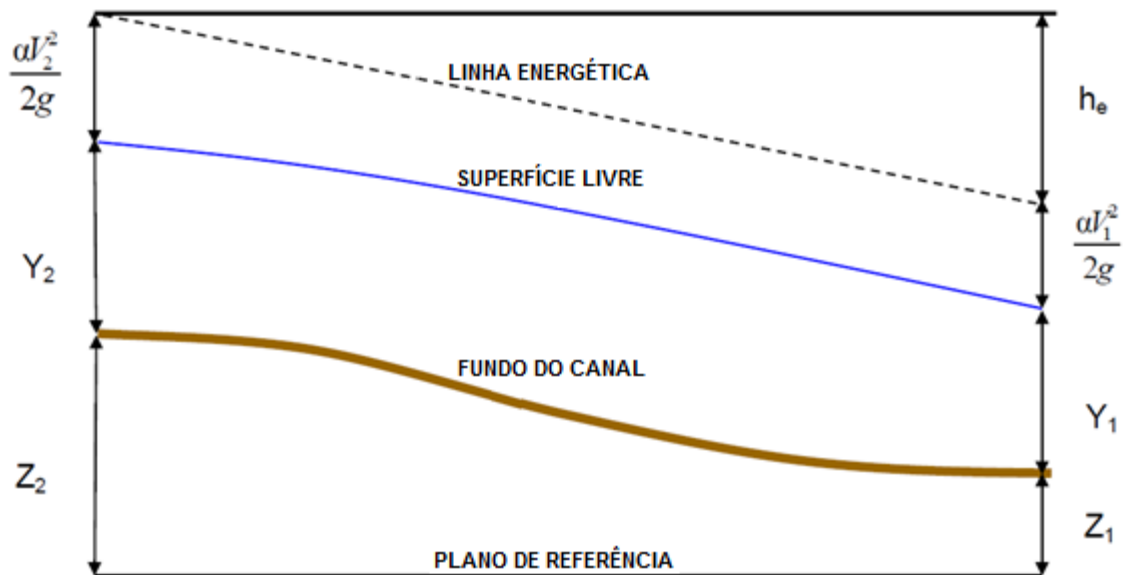
$Y_2, Y_1$  são as profundidades da superfície d'água nas seções transversais, L;

$\alpha_2, \alpha_1$  são os coeficientes de ponderação da velocidade;

$g$  é a aceleração da gravidade,  $L.T^{-2}$ ;

$h_e$  é a perda de carga, L.

Os termos utilizados nesta equação de energia são mostrados na **Figura 9**.



**Figura 9:** Diagrama apresentando os termos da equação de energia. Fonte: HEC-RAS 4.1 - Reference Manual, 2010.

A perda de carga ( $h_e$ ) entre duas seções transversais é composta de perda por atrito e perdas de contração ou expansão. A equação para a perda de carga ( $h_e$ ) é a seguinte

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (40)$$



O primeiro e o segundo termo do lado direito da equação acima representam, respectivamente, a perda por fricção e a perda por contração ou expansão, onde:

$L$  é a distância ponderada entre duas seções, L;

$\bar{S}_f$  é a declividade da linha de energia entre duas seções,  $L.L^{-1}$ ;

$C$  é o coeficiente de perda por expansão ou contração das seções transversais.

A distância ponderada ( $L$ ) entre duas seções é calculada por meio da seguinte equação

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (41)$$

onde:

$L_{lob}$ ,  $L_{ch}$ ,  $L_{rob}$  são as distâncias entre as seções transversais na planície de inundação na margem esquerda, canal principal e na planície de inundação na margem direita, respectivamente;

$\bar{Q}_{lob}$ ,  $\bar{Q}_{ch}$ ,  $\bar{Q}_{rob}$  são as médias aritméticas das vazões entre as seções transversais na planície de inundação na margem esquerda, canal principal e na planície de inundação na margem direita, respectivamente.

Para se determinar a capacidade de condução total e o coeficiente de ponderação da velocidade para cada seção transversal, o *software* realiza uma subdivisão do escoamento em áreas onde a velocidade seja uniformemente distribuída. A abordagem utilizada pelo programa HEC-RAS está em subdividir o escoamento em subseções onde há mudanças dos valores de  $n$  (coeficiente de rugosidade de Manning), como é mostrado na **Figura 10**.

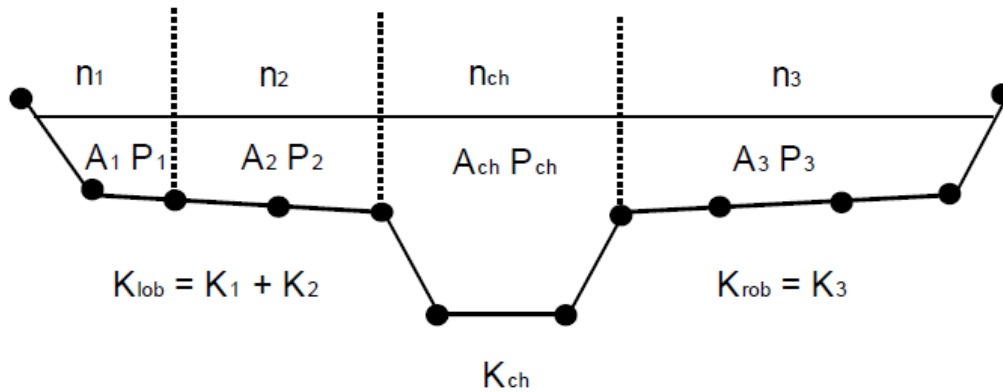


Figura 10: Método padrão utilizado pelo HEC-RAS para subdivisão de vazão. Fonte: HEC-RAS 4.1 - Reference Manual, 2010.

A capacidade de condução em cada subdivisão é calculada por meio da equação de Manning.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \bar{S}_f^{1/2} = K \cdot \bar{S}_f^{1/2} \quad (42)$$

$$K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \quad (43)$$

onde:

$K$  é a capacidade de condução em cada subdivisão,  $L^3 \cdot T^{-1}$ ;

$n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning para cada subdivisão,  $L^{-1/3} \cdot T$ ;

$A$  é a área por onde passa o fluxo em cada subdivisão,  $L^2$ ;

$R$  é o raio hidráulico para cada subdivisão,  $L$ .

O programa soma todos os incrementos de condução para obter uma capacidade de condução da margem esquerda para a direita. O canal principal, geralmente a capacidade de condução é calculada como um único elemento de fluxo, sendo assim, a capacidade de condução total na seção é obtida somando-se as capacidades de conduções das subdivisões.

O coeficiente de ponderação da velocidade é calculado baseado em uma distribuição uniforme por partes em três subseções do escoamento: planície de inundação das margens esquerda e direita e canal principal, segundo a equação

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \cdot \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3} \quad (44)$$

onde:

$A_t$  é a área total de escoamento da seção transversal;

$A_{lob}, A_{ch}, A_{rob}$  são as áreas de escoamento para a planície esquerda, canal principal e planície direita, respectivamente;

$K_t$  é a capacidade de condução total da seção transversal;

$K_{lob}, K_{ch}, K_{rob}$  são as capacidades de condução da planície esquerda, canal principal e planície direita, respectivamente.

A declividade da linha de energia é calculada pela equação de Manning e pode ser expressa por

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q}{K} \right)^2 \quad (45)$$

Para o cálculo da declividade da linha de energia, o programa utiliza a seguinte equação padrão

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (46)$$

As perdas de carga por contração ou expansão são calculadas pelo HEC-RAS por meio da equação

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (47)$$

### 3.2.1.2. DADOS DE ENTRADA DO HEC-RAS 4.1

Para modelar a hidrodinâmica de um corpo hídrico pelo modelo computacional HEC-RAS é necessário fornecer ao modelo certos dados de entrada, sendo estes: de geometria e cota da seção, distâncias entre as seções, os coeficientes de Manning e de contração e expansão e de vazão. O modelo necessita ainda de dados de condições de contorno, que servem para consolidar a modelagem do trecho escolhido. Cabe ressaltar que estes dados quando inseridos em um dos módulos de modelagem deste programa computacional podem ser utilizados por outro módulo, sem quaisquer problemas ou dificuldades.

Os dados da geometria das seções devem ser inseridos no modelo juntamente com suas cotas, sendo assim a seção representada em função de sua topobatimetria e elevação.

As distâncias devem ser inseridas levando sempre em consideração a seção a jusante, isto é, a distância entre a seção que se está inserindo os dados e a seção a jusante.

Para inserção do coeficiente de Manning, levaram-se em consideração as características do leito e do escoamento para cada trecho compreendido entre a seção que se estava inserindo os dados e a seção a jusante. Os valores do coeficiente de Manning foram retirados de CHOW (1973), que apresenta o número de Manning para diferentes características de trechos, em rios naturais.

O coeficiente de contração e expansão leva em consideração a geometria do rio, isto é, a sinuosidade, o alargamento e/ou encurtamento da calha do rio, pontes, bueiros, dentre outros. O *software* assume que há contração sempre que a velocidade de jusante for maior que a de montante. Caso a velocidade de montante seja maior que a de jusante, o programa considera ter ocorrido uma expansão no escoamento. Os valores típicos para o coeficiente de contração ou expansão ( $C$ ) são apresentados na **Tabela 2**.

**Tabela 2: Valores típicos do coeficiente de contração e expansão. Fonte: HEC-RAS 4.1 - Reference Manual, 2010.**

	<b>Contração</b>	<b>Expansão</b>
Nenhuma perda por transição calculada	0,0	0,0
Transições graduais	0,1	0,3
Seções de pontes típicas	0,3	0,5
Transições bruscas	0,6	0,8

A vazão deve ser inserida em cada trecho e afluente do estudo, sendo esta um valor único para modelagens hidrodinâmicas em regime permanente e um hidrograma para modelagens em regime não permanente.

O HEC-RAS fornece ao modelador a opção de escolha entre 4 diferentes opções de condições de contorno, sendo estas:

1. *Critical Depth*: Quando essa condição de contorno é selecionada, o usuário não precisa preencher nenhuma informação adicional. O programa irá calcular a profundidade crítica para o perfil e usará como condição de contorno;
2. *Normal Depth*: Para este tipo de condição de contorno, o usuário precisa inserir a energia da declividade que será usada no cálculo do tirante normal daquela localidade;
3. *Rating Curve*: Quando essa condição de contorno é selecionada, uma nova janela aparecerá permitindo ao usuário inserir uma curva chave;
4. *Known Water Surface Elevations*: Para essa condição de contorno o usuário deve conhecer a cota da superfície para o perfil que está sendo calculado.

### 3.2.2. MODELO DE TRANSPORTE DE MASSA

A modelagem do transporte de massa pode ser realizada a partir da utilização de modelos numéricos ou analíticos.

Segundo ROSMAN (2000), os modelos numéricos de transporte de escalares são instrumentos tecnológicos capazes de avaliar os impactos gerados pelo lançamento de uma carga poluidora em um corpo hídrico. Os modelos de transporte são muito eficazes

na determinação da concentração do poluente em uma dada seção ao longo do tempo, tendo como entrada de dados os parâmetros hidráulicos e de dispersão de poluentes.

O modelo numérico HEC-RAS utilizado neste estudo para modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha possui um módulo de qualidade de água, que pode ser utilizado também para modelar o transporte de massa, porém, a modelagem de qualidade de água está fora do escopo deste estudo.

A modelagem do transporte de massa neste estudo é realizada a partir de um modelo analítico, que pode ser aplicado para determinar o coeficiente de dispersão no escoamento a partir das curvas de concentração versus tempo obtidas por meio dos ensaios com traçadores fluorescentes. Assim, pode-se determinar por meio da equação analítica de Taylor (Equação 13) o valor do coeficiente de dispersão para cada trecho do escoamento estudado.

De acordo com TAYLOR (1954), para validação do modelo é necessário supor que o coeficiente de dispersão se mantenha constante durante o trecho estudado, fato que só pode ser verificado caso o traçador tenha percorrido uma distância ótima desde o ponto de lançamento, denominada distância de boa mistura, que é quando ocorre a mistura completa do poluente solúvel com a água do escoamento.

Neste estudo, utiliza-se o modelo analítico de Taylor também para estimar a concentração de um poluente solúvel em seções transversais onde não se obteve resultados por meio do ensaio com traçadores. Esta aplicação é comumente empregada e possibilita com certa facilidade estudar as conseqüências de um despejo acidental ou intencional em pontos de interesse a jusante do lançamento. Para tanto, é necessário o conhecimento de alguns dados de entrada do modelo, sendo estes: parâmetros hidráulicos, distância entre as seções de injeção e de controle e o coeficiente de dispersão. Este por sua vez, pode ser estimado com certa fragilidade por fórmulas empíricas ou determinado por ensaios com traçadores fluorescentes, desde que algumas hipóteses sejam satisfeitas, como foi explicado no item 3.

#### **4. ESTUDO DE CASO**

Neste capítulo é apresentada uma caracterização do rio Piabanha e de seu regime hidrológico com base em visitas de campo e na literatura existente. São descritas também as campanhas de campo com traçadores fluorescentes e de medições

convencionais. O modelo hidrodinâmico HEC-RAS 4.1 e o modelo analítico de transporte utilizados neste estudo também são abordados neste capítulo.

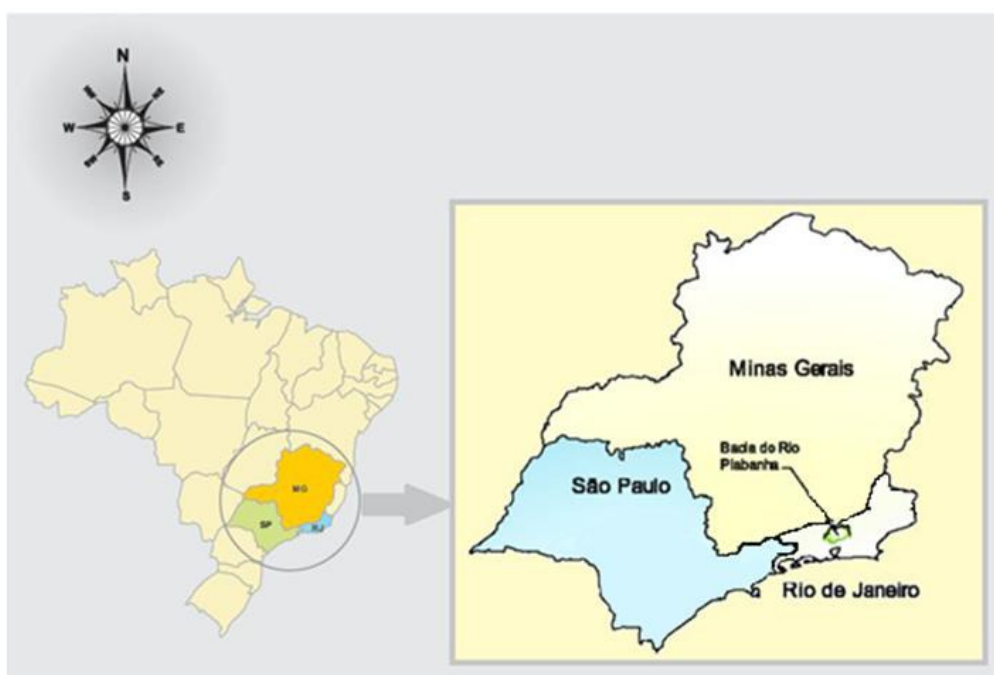
#### 4.1. BACIA DO RIO PIABANHA

A bacia do rio Piabanha foi escolhida para o presente estudo devido a sua importância econômica e aos riscos que uma má qualidade da água pode acarretar ao meio ambiente e à saúde da população que utiliza diretamente e indiretamente seus recursos.

As informações apresentadas nos subitens a seguir foram obtidas do “Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul”, disponível no portal do CEIVAP (Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul), no Plano de Manejo da APA Petrópolis, no relatório do EIBEX (Estudo Integrado de Bacias Experimentais), nos estudos de KLING (2005) e PAULA (2011) e no site da ANA (HidroWeb).

##### 4.1.1. LOCALIZAÇÃO

A bacia do rio Piabanha localiza-se no reverso da Serra do Mar, conforme é apresentado na **Figura 11**.



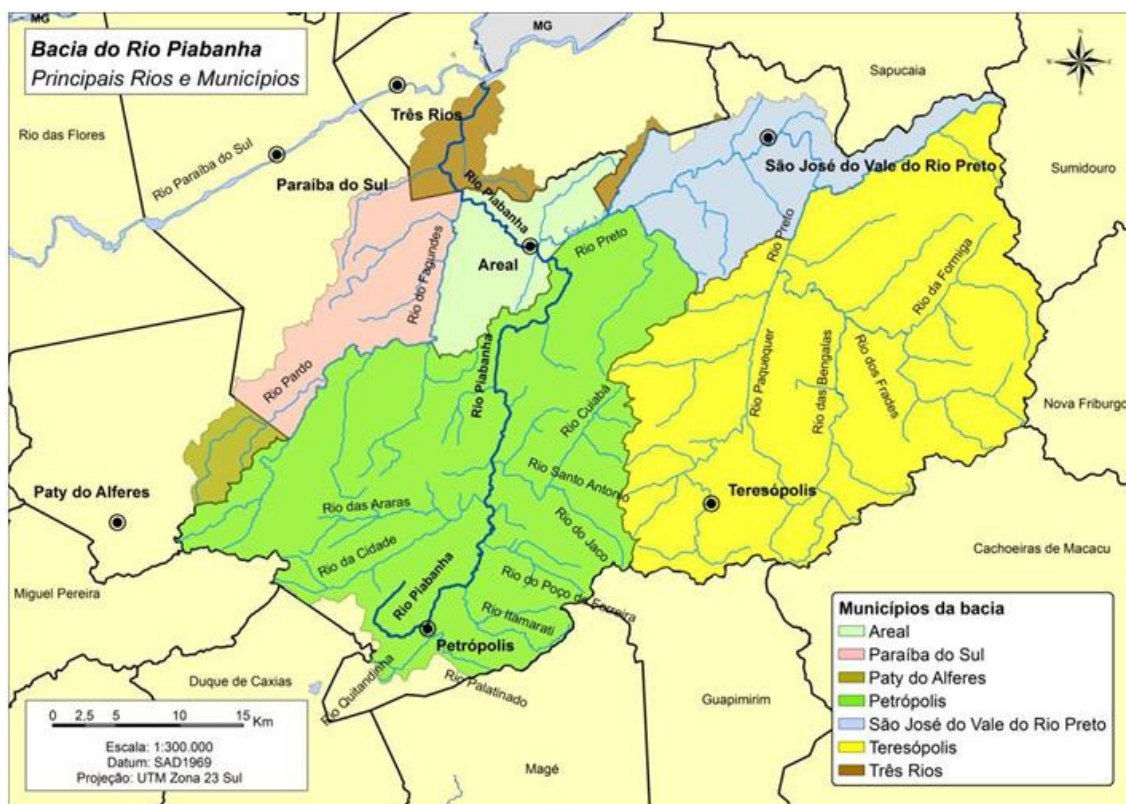
**Figura 11: Representação da localização da bacia do rio Piabanha. Fonte: COPPE/UFRJ, 2006.**

Sua área de drenagem é de aproximadamente 2.065 km<sup>2</sup>, abrangendo 4 (quatro) municípios fluminenses, onde vivem cerca de 400 mil habitantes. Os municípios abrangidos pela bacia do rio Piabanha são apresentados na **Tabela 3**.

**Tabela 3: Municípios abrangidos pela bacia do rio Piabanha. Fonte: CEIVAP, acessado em 2012.**

Municípios abrangidos
Areal
Teresópolis
São José do Vale do Rio Preto
Petrópolis

Com sua nascente na Serra do Mar a 1.546 metros de altitude, o rio Piabanha possui uma extensão de aproximados 80 km, banha os municípios de Petrópolis, Areal e Três Rios e deságua no Rio Paraíba do Sul. Seu principal afluente é o rio Preto, que tem aproximadamente 54 km de curso. O rio Paquequer, afluente do rio Preto, apresenta extensão de 37 km e banha Teresópolis, em seu trecho inicial.

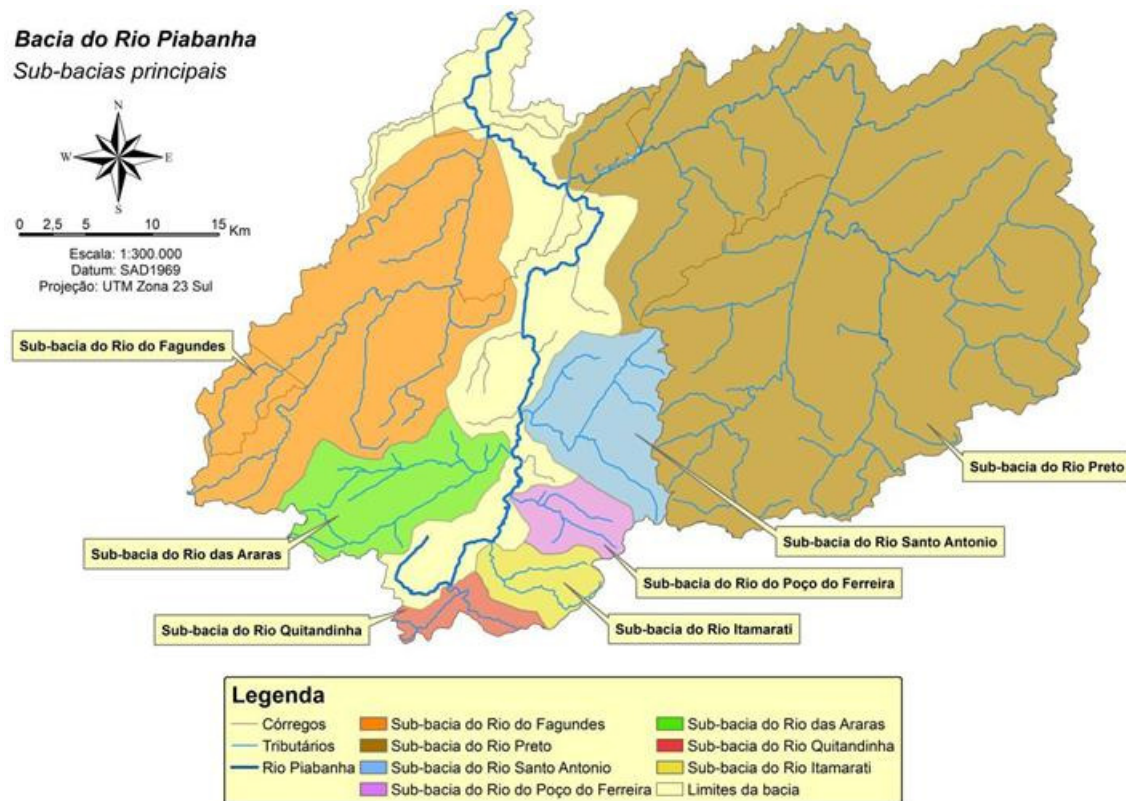


**Figura 12: Mapa político da bacia do rio Piabanha. Fonte: PAULA, 2011.**



#### 4.1.2. SUB-BACIAS

As sub-bacias mais importantes do rio Piabanha são constituídas pelos seguintes tributários: os rios Preto, Quitandinha, Itamarati, Poço do Ferreira, Santo Antônio, Araras e Fagundes, como é mostrado no mapa da **Figura 13**.



**Figura 13: Principais sub-bacias do rio Piabanha. Fonte: PAULA, 2011.**

#### 4.1.3. CARACTERÍSTICAS GERAIS

A bacia do rio Piabanha está inserida na Mata Atlântica com peculiar vegetação formada por montanhas, vales, rios e variadas espécies de fauna e flora. Esta bacia é uma das sub-bacias formadoras do rio Paraíba do Sul, sendo sua confluência pela margem direita do rio Paraíba do Sul na cidade de Três Rios, como é observada na **Figura 14**.



**Figura 14: Encontro dos rios Piabanha (margem direita), Paraibuna (margem esquerda) e Paraíba do Sul (rio principal). Fonte: KLING, 2005.**

Diversos órgãos de gestores de recursos hídricos realizam trabalhos na bacia do rio Piabanha, alguns destes órgãos são o INEA (Instituto Estadual do Ambiente), AGEVAP (Associação Pró-Gestão de Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul), CEIVAP (Comitê de Integração da Bacia do Rio Paraíba do Sul), ANA (Agência Nacional de Águas) e CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Há também alguns trabalhos de pesquisa realizados na bacia do rio Piabanha que envolvem diferentes enfoques, como modelagem da qualidade da água, avaliação de impactos ambientais, modelagem hidrodinâmica, dentre outros. No entanto, todos estes diferentes enfoques convergem para um objetivo comum, que é o de fornecer informações para a aplicação dos instrumentos dos recursos hídricos e de gestão ambiental na bacia.

Os comitês de bacia no Estado do Rio de Janeiro são entidades colegiadas com atribuições normativas, consultivas e deliberativas que compõem o Sistema Estadual de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, instituído pela Lei Estadual nº 3239/1999, cujos objetivos são coordenar a gestão integrada das águas, arbitrar administrativamente os conflitos, implementar a Política Estadual de Recursos Hídricos, promover a cobrança

pelo uso da água e planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos.

#### 4.1.4. CARACTERIZAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO

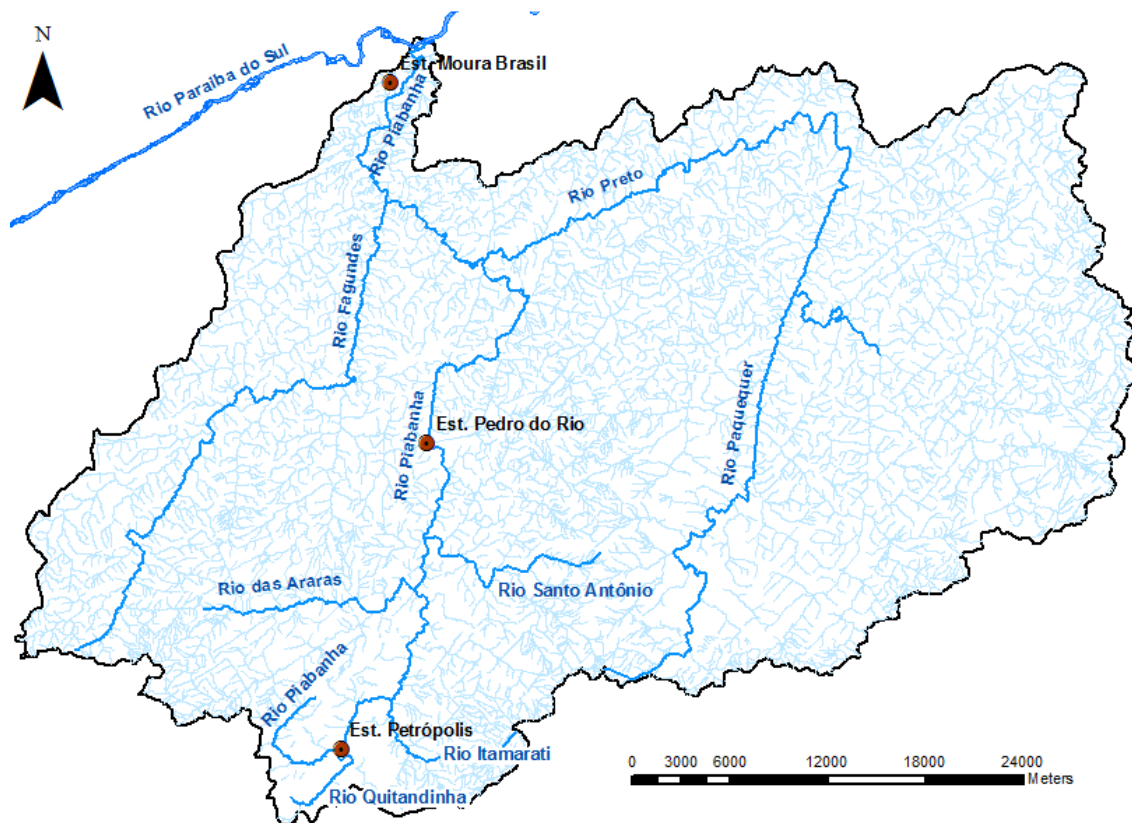
Por meio de pesquisas realizadas no site da ANA (HidroWeb), algumas estações fluviométricas foram identificadas para a bacia do rio Piabanha, sendo estas apresentadas na **Tabela 4**.

**Tabela 4: Estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Piabanha.**

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Rio</b>	<b>Responsável</b>	<b>Operadora</b>	<b>Período de dados</b>
58400000	Petrópolis	Piabanha	ANA	ANA	1938-1941; 1959-1987
58400010	Esperança	Piabanha	COPPE/UFRJ	CPRM	Sem registro de dados
58400020	Petrópolis	Quitandinha	INEA	CPRM	Sem registro de dados
58400050	Liceu Carlos Chagas	Piabanha	COPPE/UFRJ	CPRM	Sem registro de dados
58400110	Poço Tarzan	Bonfim	COPPE/UFRJ	CPRM	Sem registro de dados
58400250	Parque Petrópolis	Piabanha	COPPE/UFRJ	CPRM	Sem registro de dados
58405000	Pedro do Rio	Piabanha	ANA	CPRM	1931-1941; 1958-2011
58407000	Areal - RV	Piabanha	ANA	ANA	Sem registro de dados
58409000	Areal - RN	Piabanha	ANA	ANA	1933-1940; 1955-1970; 1973-1975
58410000	Teresópolis - Paquequer	Paquequer	INEA	INEA	Sem registro de dados
58415000	Cascata	Paquequer	ANA	ANA	Sem registro de dados
58415020	Providência	Paquequer	UERJ/UFF	UERJ/UFF	Sem registro de dados
58420000	Fazenda Sobradinho	Preto	ANA	CPRM	1935-1969; 1977-2011
58425000	Moreli	Preto	ANA	CPRM	1962-2010
58426000	UHE Areal Montante	Preto	QUANTA	QUANTA	Sem registro de dados
58428080	UHE Areal	Preto	LIGHT	LIGHT	Sem registro de dados
58429000	UHE Areal Jusante	Preto	QUANTA	QUANTA	Sem registro de dados
58430000	UHE Piabanha	Piabanha	QUANTA	QUANTA	Sem registro de dados
58434000	Fagundes	Fagundes	ANA	CPRM	1936-1941; 1956-2011
58435000	PCH Fagundes Jusante	Fagundes	QUANTA	QUANTA	Sem registro de dados
58440000	Moura Brasil	Piabanha	ANA	FURNAS	1933-2012
58442000	Fazenda Barreira	Piabanha	LIGHT	LIGHT	1951-1956; 1958-1960; 1964-1966; 1969-2004
58443000	Areal	Piabanha	INEA	INEA	Sem registro de dados

Dentre as estações fluviométricas apresentadas na **Tabela 4**, escolheu-se três estações para caracterizar o regime hidrológico do local de estudo. Dois critérios foram escolhidos para seleção das estações: a) estações com registro de dados de vazão no site da ANA; b) localização da estação fluviométrica na bacia. Assim, as estações de Petrópolis, Pedro do Rio e Moura Brasil foram selecionadas para uma caracterização geral e simplificada do regime hidrológico da bacia do rio Piabanha, pois apresentam uma série longa de dados de vazão que passaram por análise de consistência e foram consideradas representativas da parte superior, da parte média e da parte inferior do rio Piabanha, respectivamente.

A **Figura 15** traz referência à localização das estações fluviométricas de Petrópolis, Pedro do Rio e Moura Brasil.

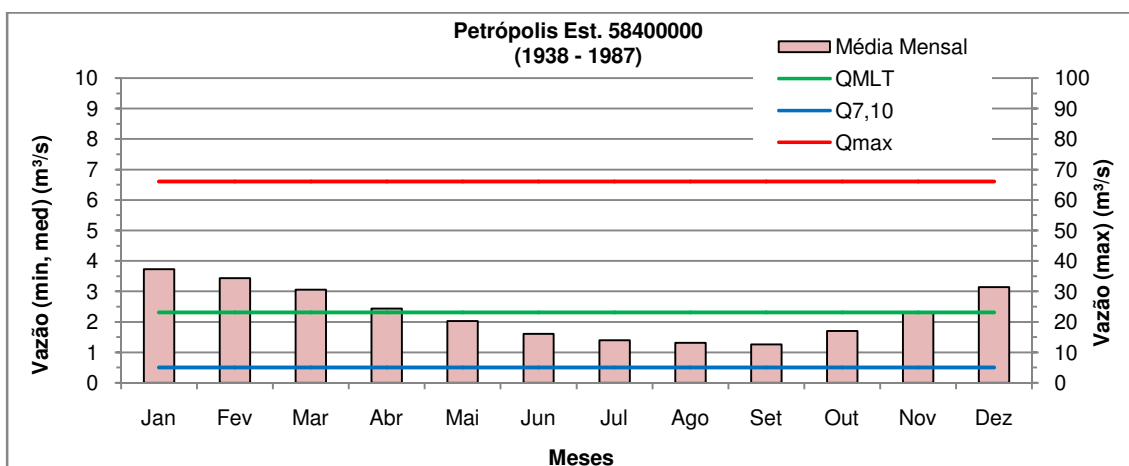


**Figura 15:** Mapa da bacia do rio Piabanha contemplando as estações de Petrópolis, Pedro do Rio e Moura Brasil.

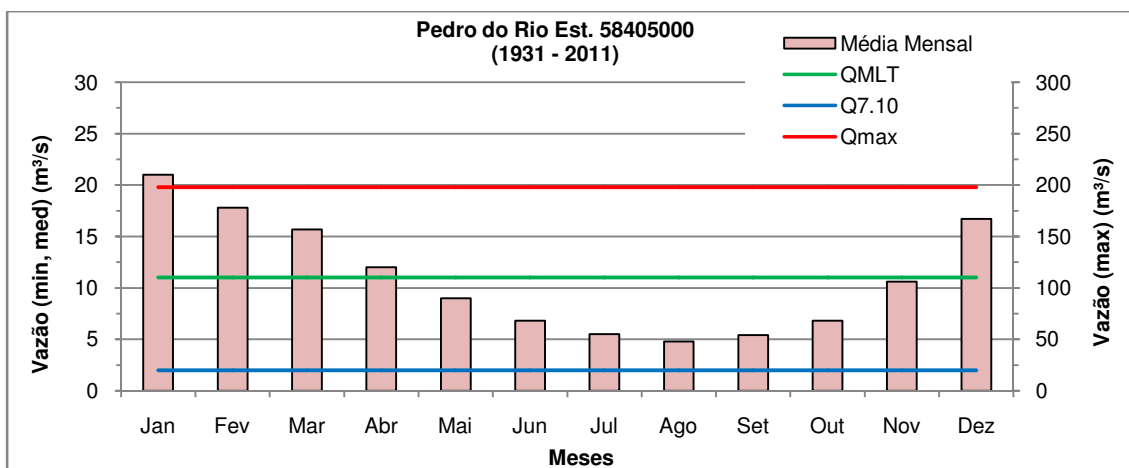
A partir da série histórica de vazão destas estações, pode-se observar que o ano hidrológico da bacia do rio Piabanha corresponde ao período de setembro a agosto do ano subsequente. As maiores vazões ocorrem de dezembro a março e as mínimas de

julho a setembro, conforme é observado nos histogramas apresentados para as estações de Petrópolis (**Figura 16**), de Pedro do Rio (**Figura 17**) e de Moura Brasil (**Figura 18**).

Cabe ressaltar que foram adicionados aos histogramas os valores de  $Q_{max}$ ,  $Q_{MLT}$  e  $Q_{7,10}$ , que são referentes à vazão máxima histórica observada, vazão média de longo termo e vazão mínima de sete dias para um tempo de recorrência de dez anos, respectivamente, para cada uma das estações.



**Figura 16:** Vazões médias mensais do rio Piabanha em Petrópolis. Fonte: ECOTEMA (2004), COPPETEC-COPPE-UFRJ (2010) e HIDROWEB, acessado em 2013.



**Figura 17:** Vazões médias mensais do rio Piabanha na estação de Pedro do Rio. Fonte: ECOTEMA (2004), COPPETEC-COPPE-UFRJ (2010) e HIDROWEB, acessado em 2013.

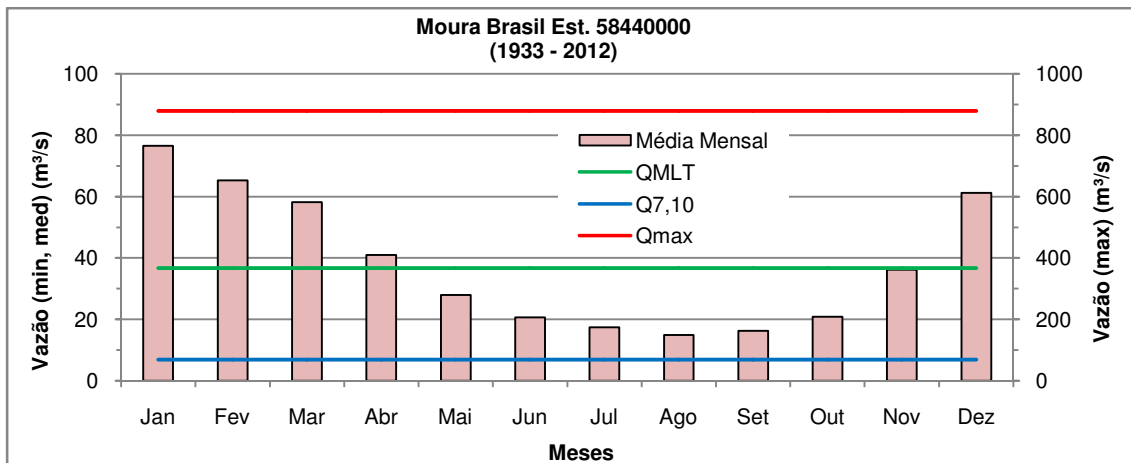


Figura 18: Vazões médias mensais do rio Piabanha na estação de Moura Brasil. Fonte: ECOTEMA (2004), COPPETEC-COPPE-UFRJ (2010) e HIDROWEB, acessado em 2013.

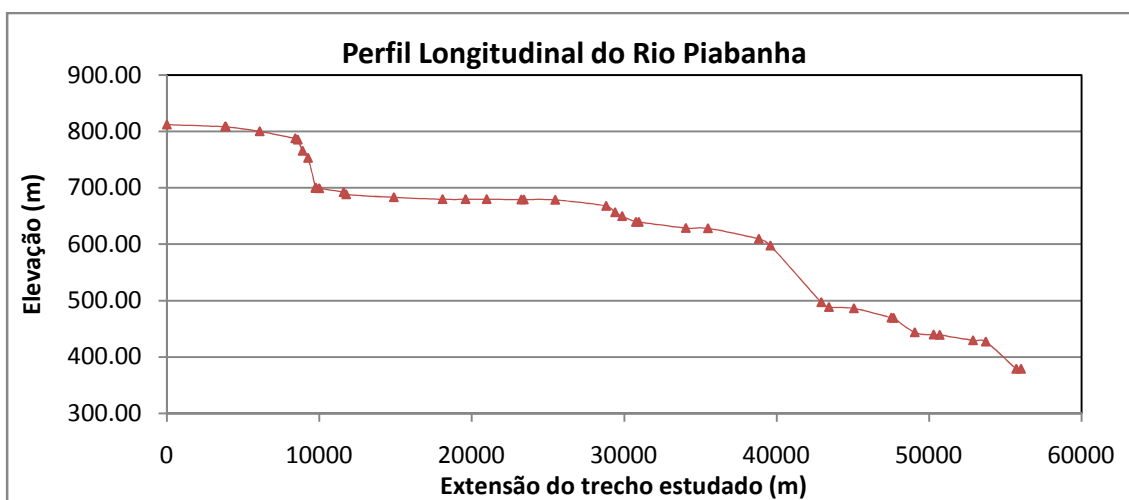
#### 4.2. DESCRIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO RIO PIABANHA

Com o auxílio de informações sobre o perfil longitudinal do rio Piabanha, uma visita de campo foi realizada com o objetivo de melhor compreender e documentar, qualitativamente, características morfológicas, a hidrodinâmica e a qualidade da água do rio. Foram encontrados sinais de degradação de qualidade de água e mudanças na calha do rio Piabanha desde os primeiros trechos visitados.

Esta visita teve como papel principal de fazer uma descrição do rio, em locais com declividades acentuadas e mais amenizadas, que é fundamental para o conhecimento do local de estudo. Cabe ressaltar que alguns destes pontos visitados foram escolhidos por serem pontos comuns aos pontos de injeção e às seções de monitoramento dos ensaios de campo com traçadores fluorescentes, que foram realizados nos dias 20 à 23/03/2012, e grande parte dos pontos visitados foram utilizados no modelo hidrodinâmico HEC-RAS 4.1 empregado neste estudo, para a modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha.

O perfil longitudinal foi obtido a partir de curvas de nível de 10 em 10 metros e pontos cotados da bacia do rio Piabanha obtidos com o INEA, o Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) da COPPE/UFRJ desenvolveu um Modelo Digital de Elevação (MDE), seguindo as recomendações do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica), com pixels de 5 metros, que auxiliou na visita de campo que foi realizada para descrição do rio Piabanha. A partir do MDE, criou-se um perfil longitudinal

(**Figura 19**) para o trecho estudado nesta dissertação, situado entre a confluência dos rios Avelá-Leman e Piabanha, no município de Petrópolis, e 200 metros, aproximadamente, a montante do reservatório da PCH Piabanha, no município de Areal.



**Figura 19:** Perfil longitudinal do trecho do rio Piabanha estudado com traçadores.

Para realização da descrição de campo foram necessários alguns equipamentos para registro e medições dos locais visitados. Neste trabalho, utilizou-se um GPS portátil, que serviu para obter as coordenadas dos pontos visitados, uma trena de 30 metros, que foi utilizada para medir a largura da calha e da lâmina d'água do rio, uma máquina fotográfica digital, para registrar imagens dos pontos visitados e ajudar com uma possível reavaliação do local, um bloco de notas para anotações e uma corda com marcações de metro em metro para se medir a profundidade das seções escolhidas para o detalhamento.

Este trabalho de campo teve seu início às 10:00 horas do dia 03/07/2012 e se estendeu até às 17:00 horas do dia 05/07/2012. No primeiro dia, buscou-se começar a caracterização do rio Piabanha pela parte superior, isto é, pela nascente, chegando assim ao término da descrição do rio Piabanha na parte inferior, no terceiro e último dia de trabalho. As **Figuras 20, 21 e 22** ilustram os pontos que foram visitados e serão descritos no decorrer deste subitem 4.2. A **Tabela 5** apresenta as coordenadas destes pontos.

Tabela 5: Coordenadas e distâncias acumuladas dos pontos descritos.

Nome (Pontos)	Coordenadas UTM WGS 84		Distância Acumulada (m)	Nome (Pontos)	Coordenadas UTM WGS 84		Distância Acumulada (m)
	E	N			E	N	
P04	684847	7513287	0	P23	691376	7517048	20865
P05	684545	7512989	500	P24	691462	7517071	21065
P06	684457	7512881	650	S04	692190	7519133	24065
P07	684192	7512621	1070	P25	691495	7520059	25565
P08	684024	7512471	1330	S05	692083	7523147	29265
P09	683409	7511794	2330	P26	692095	7523245	29405
P10	682995	7511203	3180	P27	693159	7526101	32905
P12	682954	7510533	4130	S06	692364	7528830	37005
S00	683867	7509513	5980	P28	692344	7529160	37055
P13	684142	7509483	6265	P31	692452	7529284	37385
P14	684923	7509430	7165	P29	692401	7529327	37505
P15	686146	7510225	8965	P30	692701	7532118	40305
S01	686877	7510184	9795	S07	692768	7533144	41505
P16	687495	7511899	11795	S08	694940	7534019	44805
S02	687521	7512088	11995	P32	696468	7534303	46805
P17	688591	7513363	13995	P33	697193	7535689	48905
P18	688972	7513459	14445	S09	697238	7535843	49005
P19	689442	7513529	14975	P34	698075	7537264	50705
P20	689651	7513395	15265	S10	697200	7538940	53705
S03	690683	7514644	17365	P36	695743	7539637	55905
P21	691098	7515869	19165	P37	695571	7540399	56705
P22	691316	7517002	20665	S11	692303	7542263	62105



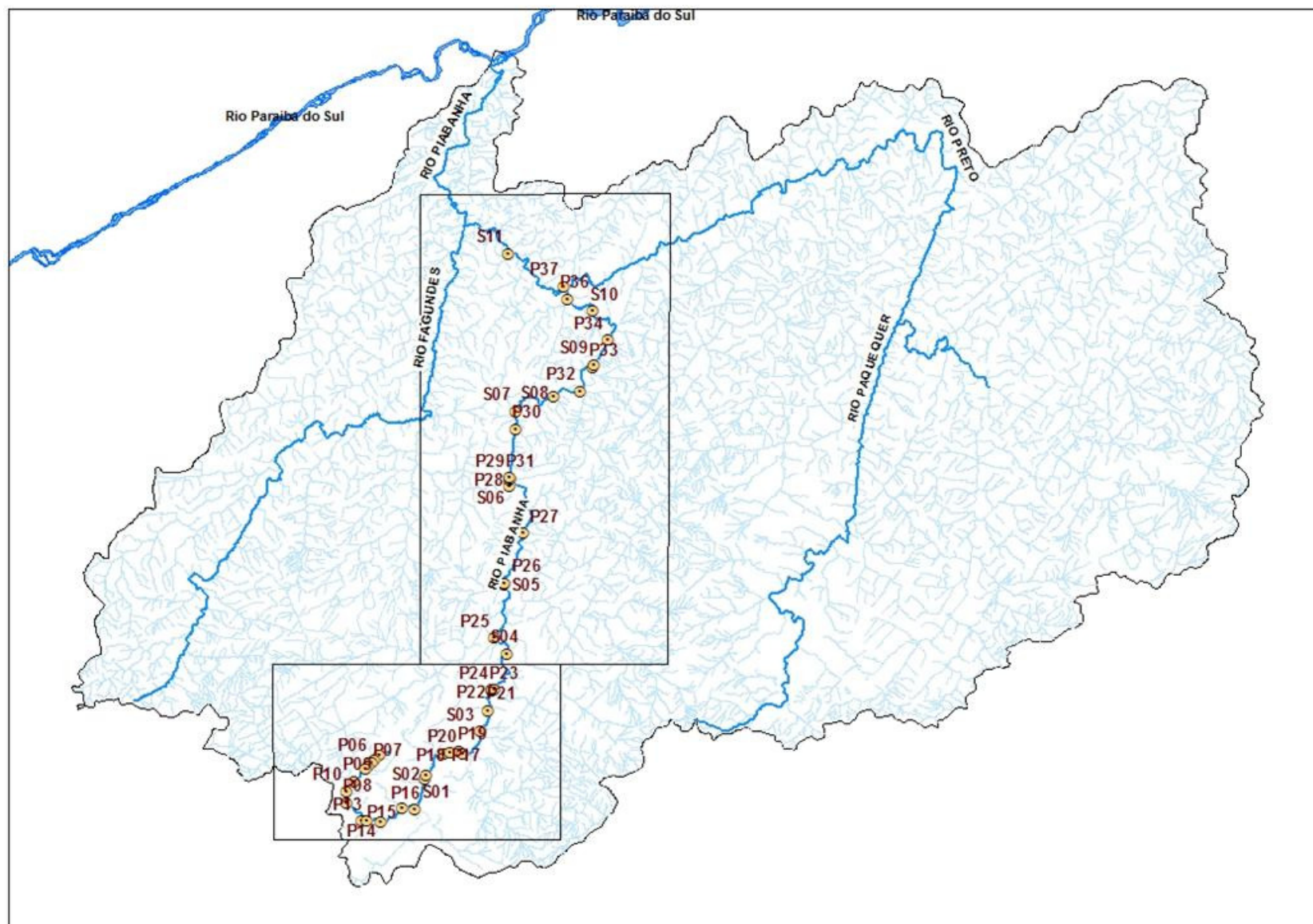


Figura 20: Pontos visitados na campanha de campo dos dias 03, 04 e 05 de agosto de 2012.

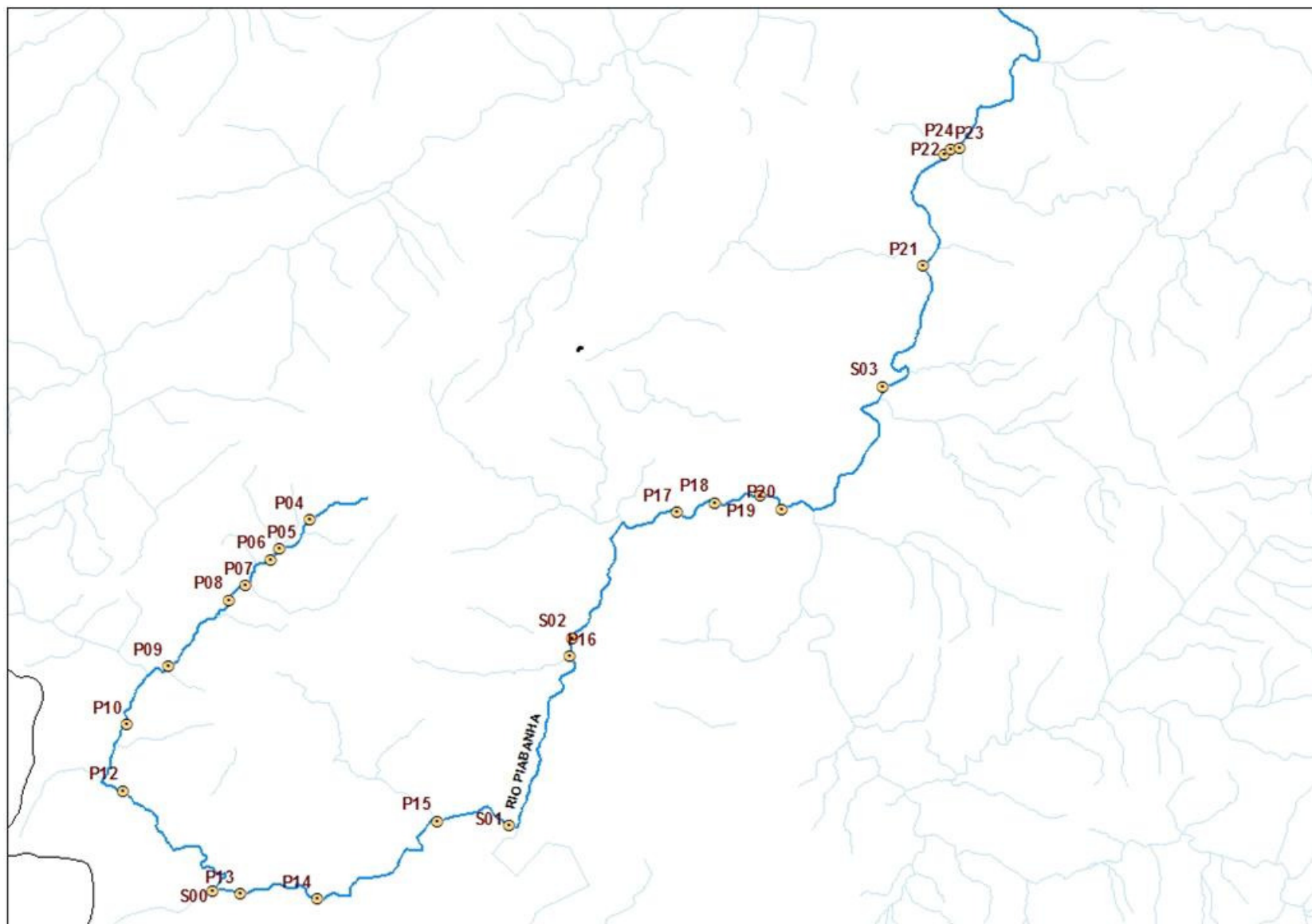


Figura 21: Pontos visitados no trecho superior do rio Piabanha.

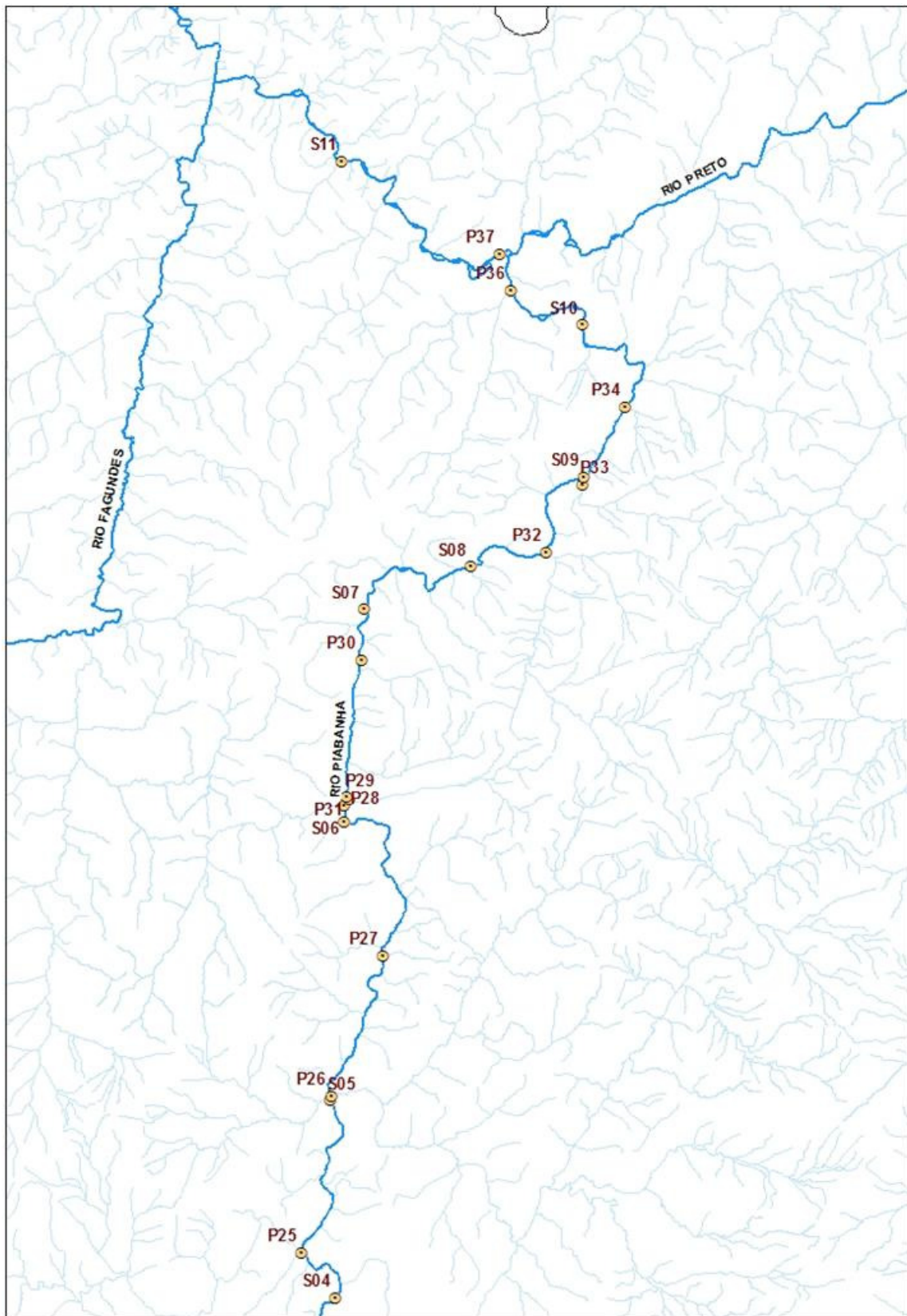


Figura 22: Pontos visitados na parte inferior do rio Piabanha.

O ponto mais próximo à nascente que foi possível alcançar está localizado em um sítio, cujo nome é Levallon. Segundo o morador local Carlos, este sítio se localiza, aproximadamente, a 500 metros da nascente do rio Piabanha.

Neste ponto (P04), observou-se que a água estava aparentemente limpa, devido a sua cor transparente e ausência de moradias a montante. Não se constatou transporte de lixo pelo escoamento, nem depósitos nas margens. O leito do escoamento é arenoso, apresentando ao longo do trecho rochas grosseiras (**Figura 23**).



**Figura 23:** Vistas da ponte sobre o rio Piabanha, onde foi realizada a descrição no primeiro ponto (P04) e do rio Piabanha, a montante desta ponte, respectivamente.

O próximo ponto observado foi o P05, que está localizado aproximadamente a 500 metros a jusante do ponto anterior. Assim como observado no P04, a água não apresentou odor e sua cor era transparente, aparentando ser uma água limpa. O leito do escoamento neste trecho é arenoso, com algumas rochas graúdas. Em suas margens, observou-se a presença de uma vegetação bem preservada. A **Figura 24** ilustra a seção P05.



**Figura 24:** Vistas a montante de P05.

Seguindo em direção a jusante, aproximadamente a 150 metros de P05, encontraram-se poços artesianos de captação de água da fábrica da NESTLE (P06). Próximo a estes poços encontra-se o rio Piabanha, que possui características semelhantes aos trechos apresentados anteriormente. Detalhes de P06 podem ser vistos na **Figura 25**.



**Figura 25:** Vista das casas de captação de água da NESTLE e de jusante do rio Piabanha no P06, respectivamente.

O próximo ponto observado foi P07 (**Figura 26**), que se localiza ao lado da fábrica da NESTLE. Neste ponto, algumas mudanças começaram a ser percebidas. Constatou-se uma diminuição da vegetação nas margens do rio. Embora a água estivesse aparentemente clara, um odor desagradável foi sentido neste ponto. Não se identificou se o odor era do rio ou da fábrica.



**Figura 26: Fotos a montante e a jusante do P07, respectivamente.**

A jusante deste ponto, aproximadamente 260 metros, observou-se o próximo ponto (P08). Neste ponto, verificou-se o transporte de lixo pelo escoamento e, também, depósitos do mesmo nas margens. Aparentemente, a água não apresentava altas concentrações de sedimentos em suspensão. Neste ponto observou-se a presença muitas casas e árvores nas margens do rio. Além disto, foi verificada também uma casa dentro da calha do rio, como podemos ver na foto de jusante do P08, **Figura 27**.



**Figura 27: Fotos de montante e jusante do P08 o rio Piabanha, respectivamente.**

O próximo ponto (P09) está localizado 1,0 km à jusante do ponto anterior. Ao redor dele, observou-se uma comunidade carente com uma enorme quantidade de casas e aparentemente sem nenhum tratamento de esgoto. Observaram-se contribuições diretas, por tubulações, das casas para o rio Piabanha. Foi constatada a presença de lixo nas margens e, também, sendo transportado pelo escoamento. A coloração da água era cinza-amarronzada. Verificou-se a formação de bolsões de água neste trecho, devido à

presença de rochas grandes e de uma “ilha”, com grande quantidade de lixo depositado, a jusante do P09, na calha do rio. A **Figura 28** ilustra o que foi dito neste parágrafo.



**Figura 28:** a) Foto a montante de P09; b) Foto ilustrando a comunidade e a contribuição direta no rio Piabanha; c) Foto de uma pequena "ilha" formada a jusante de P09; d) Ampliação da “ilha” formada na calha do rio Piabanha.

O próximo ponto foi denominado P10, que está localizado 850 metros a jusante de P09. Nele foi observado a construções de gabiões, que servem para proteger as margens e, neste caso específico, serviu também para proteção da estrada. Assim como no P09, a água apresentava uma cor cinza-amarronzada e transportava lixo. Neste ponto, verificou-se um grande acúmulo de areia, cascalho e pedras na calha do rio, que possivelmente é decorrente da obra ali envolvida. A **Figura 29** ilustra a seção P10.



**Figura 29:** Foto de montante e de jusante do ponto P10, respectivamente.

Andando um pouco a jusante do ponto P10, observaram-se grandes quantidades de lixo depositado nas margens e contribuições laterais de esgoto, como pode ser visto na **Figura 30**.



**Figura 30:** Foto tirada à jusante do ponto P10, ilustrando o lixo depositado nas margens e as contribuições laterais de esgoto.

O próximo ponto visitado foi o P12 (**Figura 31**), que está à jusante de P10, aproximadamente 950 metros. Observou-se que ele apresentou algumas mudanças em relação ao ponto anteriormente visitado, P10. Em seu leito, não se verificou a presença de rochas graúdas. Notavelmente, a água neste trecho estava detida, formando, assim, um grande “bolsão” de água, cuja velocidade era muito baixa. Com isso, os sedimentos finos transportados em suspensão decantaram e foram depositados na margem esquerda do rio Piabanha, formando assim bancos de areia. O lixo se manteve presente nesta



seção, tanto sendo transportado pelo escoamento quanto em depósitos nas margens. A coloração da água se manteve cinza-amarronzada, porém um pouco mais escura.



**Figura 31:** Fotos de montante e de jusante do ponto P12, respectivamente.

Uma mudança notável foi observada a 100 metros, aproximadamente, a jusante do ponto P12, como é mostrada na **Figura 32**. A calha que antes possuía aproximadamente 5 metros de largura e era em forma de “U”, se estreitou para aproximadamente 2 metros e passou a ter formato em “V”. Segundo WILSON JR. (2011), a característica da calha em forma de “V” pode simbolizar um estágio de juventude para este trecho do rio Piabanha.



**Figura 32:** Fotos de montante e de jusante do trecho situado a 100 metros a jusante de P12, respectivamente.

O próximo ponto visitado faz parte do trecho superior onde se iniciou a campanha de campo com o uso de traçadores fluorescentes e a modelagem com o HEC-RAS 4.1. O ponto designado como “S00” foi onde se realizou a injeção de traçadores,

que será descrita no subitem 4.4. Este ponto está localizado na confluência do rio Avelá-Leman com o Piabanha, pela margem direita. Nas margens do Piabanha, constatou-se a presença de lixo, raízes e folhas de árvores. Observou-se também a presença de contribuições laterais de esgoto. O leito do escoamento é arenoso, com alguns pontos de rochas. A água apresentava coloração escura, sem odor desagradável. Foram observados depósitos de sedimentos finos na confluência do rio Avelá-Leman com o Piabanha, isto pode ocorrer devido ao afluente perder energia na confluência, depositando assim os sedimentos em suspensão que eram transportados. A **Figura 33** ilustra este pequeno trecho do rio Piabanha descrito acima.



**Figura 33:** a) Foto de montante do rio Piabanha; b) Foto ilustrando a confluência entre os rios Avelá-Leman e o Piabanha.

Observou-se que o rio Avelá-Leman apresenta contribuição significativa no rio Piabanha, tendo em vista que, visualmente, a vazão do afluente é bem próxima à vazão do Piabanha.

Nas proximidades da confluência com o rio Piabanha, o leito do rio Avelá-Leman é arenoso, com muitas rochas. Neste trecho, a calha principal do afluente foi retificada apresentando um formato retangular. Constatou-se uma grande quantidade de contribuições laterais, encanadas. Pode-se observar o que foi descrito para este trecho na **Figura 34**.



**Figura 34:** a) Foto ilustrando o rio Avelá-Leman, a montante da confluência; b) Foto de jusante da confluência dos rios Avelá-Leman e Piabanha.

O próximo ponto analisado foi o P13 (**Figura 35**), que está localizado a 285 metros a jusante da confluência do rio Avelá-Leman com o Piabanha. Este ponto está localizado no rio Piabanha e é marcado também por uma confluência. Porém, desta vez, não foi possível identificar o nome do riacho que deságua no Piabanha. Não se constatou o transporte de lixo pelo escoamento do rio Piabanha, nem há depósitos de lixo nas margens. Aproximadamente 100 metros a montante, percebeu-se que a água escoava com velocidade muito baixa. Isto pôde ser explicado com o auxílio do perfil longitudinal, realizado neste estudo, do rio Piabanha, que mostrou que este trecho possui uma baixa declividade, e pelos resultados do modelo hidrodinâmico utilizado neste estudo, que forneceu velocidades baixas para este trecho.

Já a jusante, o trecho é encachoeirado, com muitas rochas no leito. Suas margens são arborizadas, com árvores de pequeno/médio porte. O afluente é de pequeno porte, influenciando, assim, muito pouco na vazão do rio Piabanha, que possui uma calha de 9 metros de largura aproximadamente neste trecho.



**Figura 35:** a) Vista a montante do ponto P13 no rio Piabanha; b) Vista a jusante de P13; c) Foto ilustrando o afluente, a montante da confluência com o Piabanha; d) Confluência do afluente pela margem direita com o rio Piabanha.

O próximo ponto visitado, o P14 (**Figura 36**), está a aproximadamente 900 metros a jusante de P13. Nele, observou-se um trecho com águas mais calmas, isto é, velocidades mais baixas que as observadas no trecho anterior, visualmente. Assim como observado em campo, o HEC-RAS forneceu uma velocidade média baixa para este trecho. O leito do escoamento, aparentemente, é arenoso, apresentando na margem direita um pequeno depósito de sedimentos. A jusante havia um pequeno deslizamento da margem esquerda do rio, que contribuiu para a formação de um “bolsão” de água. Água sem odor e com cor marrom clara. Foi observada a presença de lixo nas margens, mas em pequena quantidade. O trecho tem largura aproximada de 9 metros e o escoamento apresenta baixa turbulência.



**Figura 36: Vistas de montante e de jusante do rio Piabanha, tiradas do ponto P14.**

Em direção a jusante no rio Piabanha, chega-se ao ponto denominado como P15, que está localizado a 1,8 km, aproximadamente, de P14. Nele foram observadas características parecidas com as apresentadas para o trecho anterior, no que diz respeito à calha do rio, ao leito do escoamento, à coloração da água e à velocidade do rio. Com o auxílio do perfil longitudinal do rio Piabanha visto na **Figura 19** e também com observações de campo pôde-se verificar que este e o trecho anterior apresentaram declividades baixas. Por meio do HEC-RAS, verificou-se que os resultados de velocidade e nível d'água obtidos pela modelagem hidrodinâmica neste trecho e no anterior foram bem próximas.

Na margem esquerda do rio Piabanha há a confluência com o rio Mosela. Pôde-se observar que estavam ocorrendo obras de estabilização de encostas nas margens dos rios Mosela e Piabanha. Acredita-se que todas as rochas observadas no leito do rio Mosela são decorrentes da obra de estabilização de encostas que estava ocorrendo naquele determinado momento da visita. A seguir é apresentada a **Figura 37**, que ilustra o que foi dito para o ponto P15.



**Figura 37:** a) Foto de montante do ponto P15, no rio Piabanha; b) Foto ilustrando a jusante da confluência entre os rios Mosela e Piabanha; c) Foto retirada de jusante para montante da confluência do rio Mosela com o Piabanha pela margem esquerda; d) Foto de montante do rio Mosela.

O próximo ponto escolhido para realização da descrição foi o S01, que foi utilizado nos ensaios de campo com traçadores fluorescentes como seção de monitoramento. Este por sua vez, encontra-se a 830 metros a jusante de P15, em frente ao Palácio de Cristal. Não se constatou transporte de lixo pelo escoamento, nem há depósitos importantes nas margens. A coloração da água era, assim como o trecho anterior, amarronzada, porém clara, e sem odor desagradável. O leito do escoamento é arenoso ao longo deste trecho, apresentando alguns pontos de depósitos de sedimentos.

A aproximadamente 50 metros a jusante deste ponto, há um afluente, o rio Quitandinha, desaguando no rio Piabanha pela margem direita. Cabe ressaltar que o rio Quitandinha possui vazão próxima a do rio Piabanha, fato que foi comprovado com os dados obtidos a partir dos ensaios com traçadores fluorescentes. A **Figura 38** ilustra as visões de montante e de jusante deste ponto (S01).



**Figura 38:** Foto de montante e de jusante do ponto S01 do rio Piabanha, respectivamente.

Seguindo em direção à jusante de S01, aproximadamente 2,0 km, escolheu-se o próximo ponto para realizar a descrição. Este ponto foi denominado de P16. Nele foram observadas características bem parecidas com as encontradas no ponto anterior. Pode-se observar que o leito do escoamento é arenoso. A água apresentava coloração escura, aparentemente cinza-amarronzada, sem odor desagradável. Não se constatou transporte de lixo pelo escoamento, porém havia lixo depositado nas margens. Verificou-se neste trecho um alargamento e um estreitamento na calha do rio Piabanha. Sua largura média é de 12 metros, aproximadamente. A **Figura 39** apresenta o que foi descrito neste parágrafo para este trecho analisado.



**Figura 39:** Visão de montante e de jusante, respectivamente, do rio Piabanha no ponto P16.

O próximo ponto escolhido para realização da descrição foi denominado de S02, que está 200 metros a jusante de P16. Localizado próximo às estações pluviométrica e fluviométrica no Liceu Carlos Chagas, este ponto foi escolhido por ter servido como

seção de monitoramento na campanha de campo com o uso de traçadores fluorescentes. A montante deste ponto observou-se uma confluência pela margem esquerda do rio Piabanha com um riacho que não foi identificado. Neste trecho verificou-se a presença de muitas descargas laterais. Sua largura e profundidade são de aproximadamente 13 e 0,4 metros, respectivamente. Observou-se que o leito do escoamento é arenoso ao longo deste trecho, apresentando alguns pontos de depósitos de sedimentos a montante de S02. A cota da superfície d'água neste trecho pôde ser verificada por meio do modelo hidrodinâmico utilizado neste estudo. Margens arborizadas e sem a presença de lixo. A descrição deste trecho pode-se observada na **Figura 40**.



**Figura 40:** Foto ilustrando um trecho do rio Piabanha. Visões de montante e de jusante do ponto S02, respectivamente.

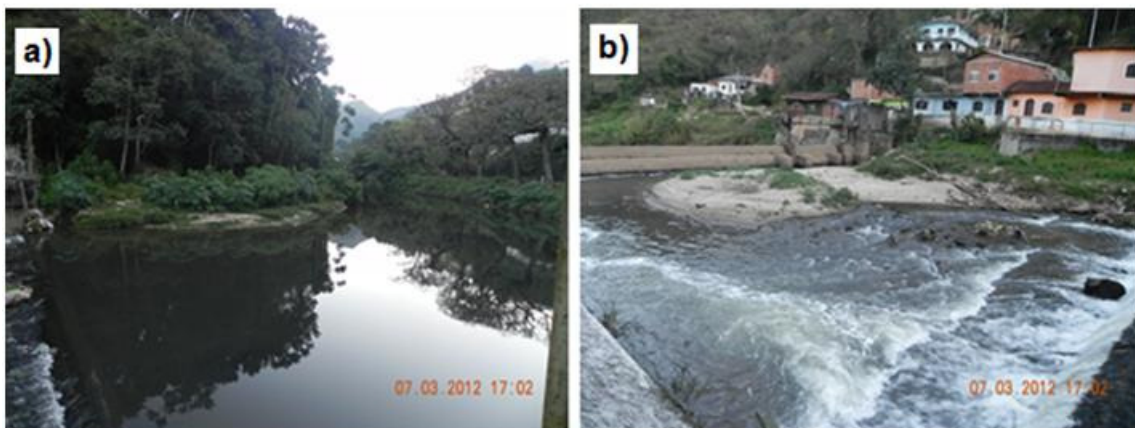
Aproximadamente 2,0 km a jusante de S02 está o ponto P17 (**Figura 41**), que foi o próximo ponto analisado. Neste trecho, observou-se a presença de rochas grosseiras nas margens e no leito do rio. Constatou-se a presença de lixo sendo transportado pelo escoamento e de depósitos nas margens. A água do rio Piabanha neste trecho não possuía odores desagradáveis e estava com uma coloração, aparentemente, cinza.





**Figura 41:** Fotos de montante e de jusante de P17, respectivamente.

O próximo ponto analisado (P18) está localizado 450 metros a jusante de P17. Este ponto encontra-se no reservatório. Com a ajuda do *Google Earth*, foi possível identificar que o reservatório possui aproximadamente 150 metros de comprimento e 15 metros de largura média. Estes foram alguns dos dados de entrada utilizados para o reservatório na modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha, que será descrita no subitem 4.6.1. As margens do reservatório são bem arborizadas, com bastante vegetação. Após o reservatório e antes das turbinas, observou-se a presença de um acúmulo de sedimentos de grande porte, reduzindo assim a calha do rio e, por consequência, aumentando a velocidade neste trecho. A **Figura 42** ilustra o reservatório descrito neste parágrafo.



**Figura 42:** a) Vista do reservatório; b) caminho da água do reservatório até as turbinas de geração de energia.

Poucos metros após o reservatório encontrou-se uma usina cujo nome é CGH Petropolitana. Segundo informações verbais com o CEIVAP, esta usina é muito antiga e

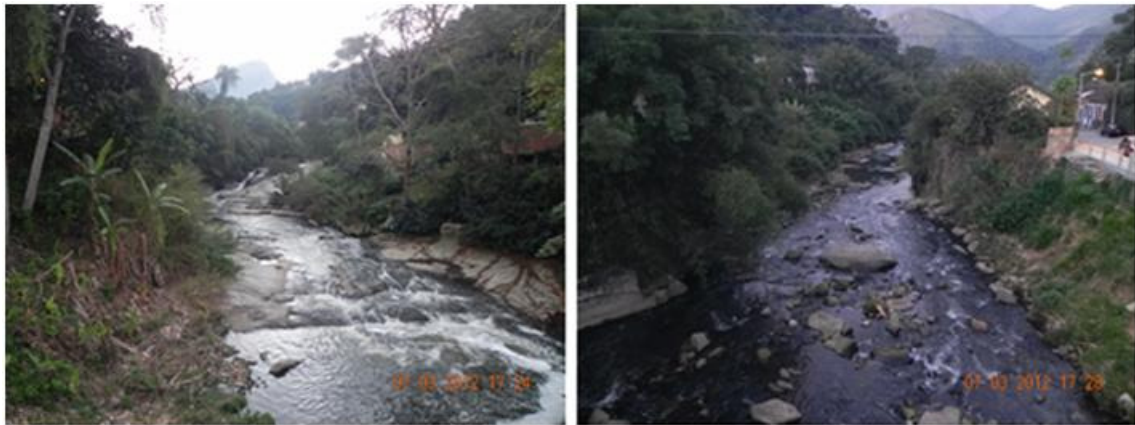
tem a capacidade de geração de 1 MW. A jusante das turbinas verificou-se um trecho com uma declividade bem acentuada. Esta declividade acentuada foi certificada com o auxílio do perfil longitudinal do rio Piabanha e foi utilizada como dado de entrada na modelagem hidrodinâmica. O rio escoava a uma velocidade bem alta, em um trecho bem encachoeirado. A velocidade média neste trecho que, visivelmente, é bem alta foi determinada com o auxílio do HEC-RAS. Seu leito é rochoso, com presença de muitas rochas grosseiras, com isso, "bolsões" de água são formados. Verificou-se a presença expressiva de garrafas PET em um desses "bolsões" de água formados. Este trecho é conhecido como a Cachoeira da Cascatinha. A **Figura 43** foi tirada de jusante das turbinas de geração de energia.



**Figura 43:** a) Foto panorâmica ilustrando o escoamento a jusante do vertedor; b) Foto ilustrando o acúmulo de garrafas PET em um bolsão de água.

A jusante de P18 foi observado um trecho com uma declividade bem acentuada. Este trecho possui aproximadamente 1,1 km de extensão. Nele foram observados dois pontos, P19 e P20, que estão a 530 e 820 metros, respectivamente, a jusante do vertedor do reservatório. Para ambos os pontos, foram observadas algumas características semelhantes. Seus leitos são rochosos ao longo do trecho, com grande quantidade de rochas grosseiras na calha do rio. Suas calhas possuem larguras irregulares, ora com alargamento, ora com estreitamento. Segundo o perfil longitudinal do rio Piabanha apresentado na **Figura 19**, este trecho possui um desnível acentuado de aproximadamente 100 metros.

Algumas particularidades puderam ser notadas também nestes dois trechos. Em P19 observou-se um trecho pouco encachoeirado, com margens bem arborizadas. Já em P20, verificou-se que se tratava de um trecho bastante encachoeirado, com presença de lixo, vegetação e casas nas margens. As **Figuras 44 e 45** ilustram os pontos P19 e P20, respectivamente.



**Figura 44:** Foto tirada de montante e de jusante do ponto P19, respectivamente.



**Figura 45:** Fotos tiradas à jusante de P20, ilustrando o trecho analisado.

O próximo ponto analisado, S03, está a 2,1 km de distância a jusante de P20. Este ponto serviu como seção de monitoramento para o ensaio com traçadores fluorescentes. Nele, observou-se uma declividade suave. Neste trecho, verificou-se que a largura da calha é variada, apresentando a jusante deste ponto uma ilha formada dentro da calha, bem vegetada, que contribuiu para a formação de um "bolsão" de água. O leito do escoamento é arenoso ao longo deste trecho, apresentando uma grande quantidade de rochas. Não se constatou o transporte de lixo pelo escoamento, nem há depósitos importantes nas margens. A água apresentava coloração escura, porém não

apresentou odor desagradável. As margens do rio são bem vegetadas, apresentando algumas residências nas proximidades. O trecho que contém o ponto S03 é apresentado na **Figura 46**.



**Figura 46:** Visões de montante e de jusante de S03, respectivamente.

O próximo ponto escolhido para descrever o rio Piabanha foi o P21, que está localizado a 1,8 km de distância a jusante de S03. Foi constatada a presença de lixo sendo transportado em pequena quantidade pelo escoamento e depositado nas margens. Verificaram-se também margens bem vegetadas. A montante deste ponto observou-se uma grande quantidade de casas nas proximidades da margem direita do rio. Não se constatou a presença de rochas graúdas no escoamento, nem a formação de bolsões de água. O leito do escoamento é arenoso ao longo do trecho, apresentando em alguns pontos nas margens depósitos consolidados de sedimentos. Conforme verificado no perfil longitudinal e no HEC-RAS, este trecho apresenta baixas declividades e baixas velocidades, respectivamente. Este trecho descrito pode ser observado na **Figura 47**.



**Figura 47:** Foto tirada no ponto P21 ilustrando o trecho descrito acima.

O próximo ponto analisado foi o P22, que está localizado a, aproximadamente, 1,5 km a jusante de P21. Neste trecho foram observadas características parecidas com as do trecho anterior. Neste trecho notou-se um aumento na urbanização, conseqüentemente verificaram-se alguns pontos de contribuição por encanamentos, e uma diminuição da vegetação nas margens. Um grande depósito de sedimentos consolidados foi observado à jusante deste ponto, na margem direita do rio Piabanha. Devido a este banco de areia, constatou-se uma diminuição da velocidade da água próxima a margem direita, formando assim um pequeno bolsão de água. Observou-se também um acúmulo de lixo no pilar da ponte, provavelmente proveniente da última cheia ocorrida. Na **Figura 48** podem-se observar as características descritas neste parágrafo.



**Figura 48:** Visões de montante e de jusante de P22, respectivamente.

A 200 metros, aproximadamente, a jusante de P22 está o ponto P23, que está localizado na confluência dos rios Bonfim e Piabanha. Esta confluência se dá pela margem direita do Piabanha. Nela puderam-se observar pontos de depósitos argilosos consolidados. Observou-se também a formação de um banco de areia na margem esquerda do rio Piabanha, próximo a confluência. A água que desaguava no Piabanha pelo Bonfim possui uma coloração, visualmente, mais clara. Neste trecho, constatou-se que não havia rochas graúdas no leito do rio, tão pouco nas margens. Não se verificou transporte de lixo pelo escoamento, mas há depósitos nas margens. Notou-se a presença de casas ao redor das margens do rio Piabanha, sendo a margem esquerda com maior concentração. Verificou-se que este trecho possui uma declividade baixa e, por

consequência, uma velocidade baixa, que puderam ser comprovadas por meio do perfil longitudinal do rio Piabanha apresentado na **Figura 19** e do modelo hidrodinâmico. A **Figura 49** apresenta as fotos tiradas à montante e à jusante desta confluência.



**Figura 49:** a) Visão de montante da confluência entre os rios Bonfim e Piabanha; b) Visão da confluência entre os rios e de jusante da mesma.

A montante desta confluência, no rio Bonfim, observou-se um trecho com aproximadamente 200 metros de extensão com depósito de sedimentos nas margens do rio e sem contribuições laterais. A montante deste trecho observou-se que a largura da calha era irregular, devido a grandes depósitos de sedimentos. Constatou-se também a presença de contribuições laterais de esgoto, mas não se verificou odor desagradável. As fotos tiradas à montante da confluência, no rio Bonfim, estão apresentadas na **Figura 50**.



**Figura 50:** a) Foto tirada a montante da confluência dos rios Bonfim e Piabanha, trecho de aproximadamente 200 metros; b) Foto tirada a montante deste trecho apresentado na letra a).

O próximo ponto descrito foi o S04 (**Figura 51**), que também foi utilizado como seção de monitoramento do ensaio com traçadores fluorescentes. Este ponto está localizado 3,0 km a jusante de P24. O leito do escoamento é arenoso ao longo do trecho, apresentando pneus e rochas pequenas em alguns pontos. A jusante verificou-se um ponto de dragagem, que estava sendo realizado com o auxílio de um bambu e uma pá, manualmente, por um homem. Sua calha possui largura de 18 metros e profundidade aproximada de 0,5 metros. Cabe ressaltar que este ponto foi utilizado também no programa computacional, HEC-RAS, para modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha.



**Figura 51:** Fotos de montante e de jusante do ponto S04, respectivamente.

O próximo ponto escolhido para o detalhamento foi o P25, que está localizado a jusante de S04, aproximadamente 1,5 km de distância, na confluência entre o rio das Araras e o Piabanha, pela margem esquerda. O leito do escoamento do afluente e do rio Piabanha é arenoso, apresentando pontos de depósito de sedimentos na confluência. Constatou-se a presença de lixo flutuante sendo transportado pelo afluente, e há depósitos nas margens. O escoamento do afluente continha nuvens de óleo, mas não apresentava odores desagradáveis. Cabe ressaltar que este ponto e este afluente foram utilizados na modelagem hidrodinâmica, por considerar que este afluente possui uma contribuição importante ao rio Piabanha.

A **Figura 52** ilustra as fotos tiradas da confluência e de jusante da mesma.



**Figura 52:** Fotos tiradas da confluência entre os rios das Araras e Piabanha, e de jusante da confluência, respectivamente.

O próximo ponto escolhido está localizado a 3,7 km de distância a jusante de P25 e foi chamado de S05. Este ponto foi utilizado também no ensaio com traçadores fluorescentes como seção de monitoramento. Este ponto está aproximadamente a 150 metros, a montante, da confluência entre os rios Santo Antônio e Piabanha. A água apresenta coloração escura e não se constatou transporte de lixo pelo escoamento, nem depósitos importantes nas margens. A montante, as margens são bem vegetadas. A jusante, o leito do rio está sendo dragado e, também, estão ocorrendo obras de proteção das margens. Este trecho possui uma baixa declividade, uma profundidade superior às seções descritas a montante e águas calmas, fatos que puderam ser comprovados com o perfil longitudinal e com o modelo HEC-RAS. A **Figura 53** apresenta as fotos tiradas deste ponto.



**Figura 53:** Fotos tiradas de montante e jusante, respectivamente, de S05.



O próximo ponto (P26) escolhido para realizar a descrição foi na confluência entre os rios Santo Antônio e Piabanha. Devido às obras de dragagem e proteção das margens que estavam sendo feitas, a coloração da água do rio Santo Antônio era barrenta, pois apresentava altíssimas concentrações de sedimentos em suspensão em seu escoamento. Este rio, por apresentar contribuição importante ao rio Piabanha, foi considerado na modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha. A **Figura 54** ilustra o que foi descrito neste parágrafo.



**Figura 54:** Visões do rio Santo Antônio, de montante da confluência com o rio Piabanha pela margem direita, e da confluência dos dois rios, respectivamente.

A jusante da confluência dos rios Santo Antônio e Piabanha, aproximadamente 3,5 km, está localizado o ponto P27. A água do escoamento neste ponto ainda estava com coloração barrenta e transportando sedimentos finos em suspensão. A montante não foi verificada a presença de rochas graúdas no leito do rio. No pilar da ponte há um tronco de árvore grande preso, acumulando lixo e dificultando o escoamento da água, com isso, formou-se um bolsão de água nesta parte do rio. Constatou-se o transporte de lixo pelo escoamento e há depósitos importantes nas margens. O lixo foi encontrado também em marcas recentes de cheia, em grande quantidade, cerca de 2,0 metros acima do nível d'água do dia 04/07/2012. A jusante observou-se a formação de bolsões de água, decorrentes da presença de rochas graúdas no leito e nas margens do escoamento. Verificou-se que as margens do rio, neste trecho, são bem vegetadas. A **Figura 55** ilustra este trecho descrito.



**Figura 55:** a) Visão de montante do ponto P27; b) Foto do tronco de árvore preso no pilar da ponte impedindo a passagem da água; c) Foto de jusante do ponto P27; d) Foto do lixo encontrado nas marcas de cheia.

O próximo ponto a jusante de P27 escolhido para se descrever foi o ponto S06, que está localizado na ponte principal em Pedro do Rio, a uma distância de 4,1 km do ponto anterior. Este ponto foi utilizado no ensaio de campo com o uso de traçadores fluorescentes, como seção de monitoramento da segunda campanha e ponto de injeção da primeira campanha. Estes detalhes serão descritos no subitem 4.4.

Devido às obras de contenção de encostas que estavam ocorrendo nas margens do rio Santo Antônio e na confluência com o Piabanha no dia 04/07/2012, observou-se que a água apresentava coloração barrenta, pois transportava uma grande quantidade de sedimentos em suspensão. Não se constatou o transporte de lixo pelo escoamento, mas há depósitos de lixo nas margens. Observou-se também a presença de casas nas margens do rio, contribuindo diretamente através de encanamentos. O leito do rio ao longo deste trecho é arenoso, apresentando na margem direita do rio um depósito de sedimentos, a montante deste ponto.

Neste trecho analisado, a profundidade e a largura média da calha do rio são de 1,0 e 18 metros aproximadamente. Cabe ressaltar que este ponto foi utilizado para a modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha com o HEC-RAS.

A **Figura 56** ilustra as fotos tiradas no ponto S06 do trecho descrito, em Pedro do Rio.



**Figura 56:** Visões de montante e de jusante de S06, respectivamente.

A jusante de S06, aproximadamente 500 metros, está localizado o ponto P29, em Pedro do Rio. Neste ponto constatou-se a presença de réguas linimétricas da ANA e de um marco de RN (Referência de Nível) do IBGE (**Figura 57**). A montante deste ponto verificou-se a presença de duas pequenas contribuições laterais no rio Piabanha, uma pela margem direita, a 50 metros e outra pela margem esquerda, a 190 metros. Ambas as contribuições apresentaram lixo depositado nas margens e sendo transportado pelo escoamento. Observou-se também a presença de ratos no local e um odor muito desagradável.



**Figura 57:** Fotos tiradas das réguas linimétricas e do RN em Pedro do Rio.

O próximo ponto escolhido para a descrição foi o P30, que está a 2,8 km de distância a jusante de P29. Neste trecho, verificaram-se margens bem vegetadas com presença de muitas rochas. A água apresentou coloração menos barrenta que a observada no ponto anterior e, por não possuir nenhuma contribuição lateral significativa entre estes pontos, pode-se inferir de que neste ponto a descarga sólida era menor que a observada no trecho anterior. Não se constatou o transporte de lixo pelo escoamento, nem há depósitos significativos nas margens. A **Figura 58** ilustra o trecho descrito para o ponto P30.



**Figura 58: Fotos tiradas de montante e de jusante de P30, respectivamente.**

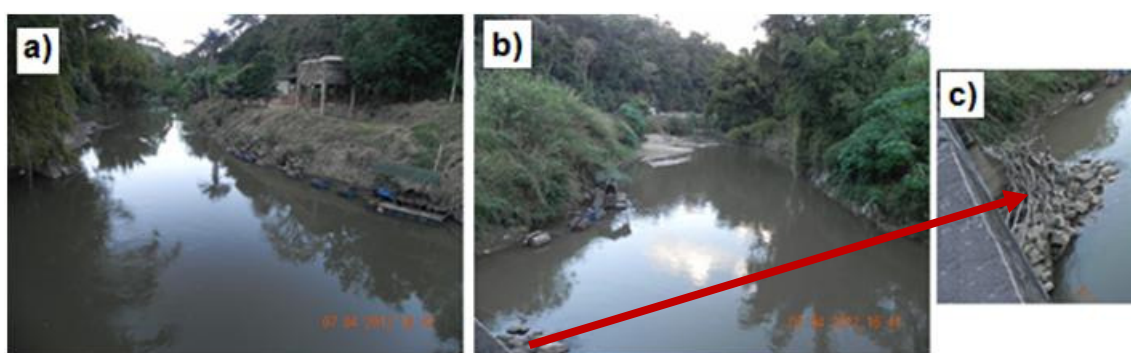
O ponto S07 foi o próximo ponto escolhido para se realizar uma descrição. Este ponto foi utilizado nos ensaios de campo com traçadores fluorescentes, como seção de monitoramento. Este, por sua vez, está localizado a aproximadamente 1,2 km de P30. Segundo informações de moradores locais, este local é conhecido como “Ponte Quebrada de Areal”. Neste trecho, a profundidade e a largura média são de, aproximadamente, 1,0 e 25,0 metros, respectivamente. A água apresentou coloração escura, sem qualquer odor desagradável. Não se verificou o transporte de lixo pelo escoamento, nem há depósitos significativos nas margens. O lixo foi encontrado apenas em marcas recentes de cheia cerca de 1,0 metro acima do nível d’água do dia 04/07/2012, retido em árvores das margens do rio. Verificaram-se também o acúmulo de lixo, galhos de árvores e pedras no pilar da ponte.

O leito do rio neste trecho é arenoso, apresentando depósitos consolidados de sedimentos na margem direita do rio, a montante deste ponto, e na margem esquerda, a jusante.

Observou-se a presença de dragas no local, para extração de areia. Segundo informações de morador local, as dragas estão inativas, pois o responsável pelas dragagens neste local está aguardando a licença ambiental do INEA. Em dias em que há extração de areia, o rio chega a ter profundidade próxima a 3 metros, segundo informações de trabalhador local.

Cabe ressaltar que este ponto foi utilizado na modelagem hidrodinâmica e apresentou ótimos resultados quando comparados com os obtidos pelo uso da técnica de traçadores fluorescentes.

A **Figura 59** ilustra a descrição feita para o trecho que contém o ponto S07.



**Figura 59:** a) Vista de jusante de S07; b) Foto tirada de S07, com vista de montante deste ponto; c) Foto do acúmulo de galhos, lixo e pedras, observado no pilar da ponte.

O próximo ponto escolhido para realizar a descrição foi o S08, que está localizado a 3,3 km de distância a jusante de S07. Assim como S07, este ponto também foi utilizado na campanha de campo com o uso de traçadores fluorescentes como seção de monitoramento da nuvem de traçadores. Este ponto é conhecido como MANAAIM. Assim como no trecho anterior, a água possui coloração escura, sem qualquer odor desagradável. Não se verificou o transporte de lixo pelo escoamento, mas há depósitos nas margens. O lixo foi encontrado também em marcas recentes de cheia cerca de 0,5 metros acima do nível da água do dia 04/07/2012.

O leito do rio neste trecho é arenoso, apresentando alguns pontos rochosos. Sua calha é de aproximadamente 35 metros. Devido às rochas no leito do escoamento, observou-se a formação de alguns bolsões de água a montante de S08. Este trecho do rio apresentou um escoamento em baixa velocidade, fato que foi comprovado com o uso do HEC-RAS.

Constatou-se, neste trecho, uma pequena contribuição lateral na margem direita do rio Piabanha. Este pequeno riacho possui, em média, 0,5 metros de largura de lamina d'água. Observou-se a presença de vegetação e de lixo nas margens deste afluente. Seu leito é arenoso, mas com a presença de muitas pedras.

A **Figura 60** ilustra o trecho do rio Piabanha descrito acima e o seu afluente.



**Figura 60:** a) Visão de montante de S08; b) Foto tirada de S08 pra jusante deste trecho do rio Piabanha; c) Foto tirada do afluente, a montante da confluência; d) Foto tirada de montante pra jusante do afluente desaguando no Piabanha.

A jusante de S08, aproximadamente 2,0 km, está localizado o ponto P32. Este ponto está localizado sobre um córrego, afluente do rio Piabanha pela margem direita. Segundo bases de dados do *ArcGis*, fornecidos pelo INEA ao Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC/COPPE/UFRJ), o nome deste afluente é Córrego da Jacuba.

A jusante deste ponto, aproximadamente 30 metros, encontra-se a confluência entre este córrego com o Piabanha. Nela, constatou-se a presença de muitas rochas graúdas. O leito do córrego é arenoso ao longo deste trecho, apresentando uma grande

quantidade de rochas. A água é clara, aparentemente limpa, sem apresentar qualquer odor. Suas margens são bem vegetadas, apresentando uma grande quantidade de árvores.

A montante deste ponto, aproximadamente 100 metros, há uma cachoeira, cujo nome é Cachoeira da Barra, segundo moradores locais. Esta cachoeira é utilizada como área de lazer pelos moradores e como local de retirada de areia. Constatou-se a presença de uma barragem neste local, que serve não somente para melhorar as condições de banho dos moradores, diminuindo assim a velocidade e aumentando o nível da água, mas também para ajudar nos depósitos arenosos nesta parte, devido à diminuição da energia para transportar estes sedimentos.

As fotos tiradas neste trecho estão apresentadas na **Figura 61**.



**Figura 61:** a) Foto tirada pra montante de P32; b) Foto tirada a jusante de P32, ilustrando a confluência do Córrego Jacuba com o rio Piabanha; c) Visão da Cachoeira da Barra.

O próximo ponto analisado foi o S09 (**Figura 62**), que está localizado a 2,2 km de distância a jusante de P32. Este ponto encontra-se próximo à Escola Municipal

Beatriz Zaleski, na Posse. Este ponto foi utilizado como seção de monitoramento no ensaio com traçadores fluorescentes. Como pode ser visualizado no perfil longitudinal da área de estudo, o trecho compreendido entre a Seção 08 e Seção 09 possui grande declividade, chegando a 100 metros aproximadamente a diferença entre as elevações nestas seções.

A montante deste ponto, aproximadamente 100 metros, há uma confluência com um córrego, cujo nome é desconhecido, pela margem direita. Não se constatou a presença de lixo sendo transportado pelo escoamento, nem há depósitos significantes nas margens. A água apresentou coloração barrenta neste trecho. Observou-se que as margens do rio Piabanha, neste trecho, são bem arborizadas, com bastantes rochas graúdas. A largura da calha no nível da água foi de 15 metros, aproximadamente. O leito é arenoso ao longo deste trecho, apresentando muitos pontos com rochas pequenas e graúdas, que acarretam, neste caso, na formação de bolsões de água.



**Figura 62: Vistas de montante e de jusante de S09, respectivamente.**

A jusante de S09, aproximadamente 1,7 km, está localizado o próximo ponto analisado, P34. Este ponto está localizado na confluência de um pequeno córrego com o rio Piabanha, pela margem direita. Visivelmente, este afluente possui uma vazão muito pequena, quando comparada com a vazão do rio Piabanha neste trecho, com isso, sua contribuição é praticamente imperceptível.

A água do afluente apresentava uma coloração cinza clara, e tinha um odor desagradável. Constatou-se que na confluência há um depósito de sedimentos finos, isto pode ocorrer devido à perda de energia do afluente ao encontrar com o Piabanha.



Neste trecho, o rio Piabanha apresentou coloração barrenta, por isso, pode-se inferir que seu escoamento transportava grande massa de sedimentos finos. Observou-se também que a jusante deste ponto, há uma grande quantidade de rochas graúdas no leito do rio Piabanha, alterando assim a largura da calha no nível que a água estava no dia 05/07/2012. Com isso, verificou-se a formação de bolsões de água a montante destas rochas, que reduziram bastante a velocidade da água. Devido a essa diminuição da largura da calha, a velocidade do rio a jusante ficou, visivelmente, superior que a montante destas rochas. Não se verificou transporte de lixo pelo escoamento, mas há depósitos nas margens. Constatou-se a presença de casas ao redor da margem direita e vegetação na margem esquerda do rio Piabanha. A **Figura 63** ilustra o que foi dito para este afluente e trecho do rio Piabanha.



**Figura 63:** a) Vista do afluente, a montante da confluência; b) Foto tirada da confluência entre o córrego e o Piabanha; c) Visão do rio Piabanha, a jusante da confluência.

O próximo ponto escolhido para se fazer a descrição foi o S10, que está à jusante de P34, a uma distância de 3,0 km. Este ponto foi utilizado como seção de

monitoramento no ensaio com traçadores fluorescentes, que ocorreu entre os dias 19 e 23 de março de 2012, e será descrito no subitem 4.4.

A água possui coloração barrenta, com isso, pôde-se presumir que há sedimentos finos em suspensão sendo transportados neste trecho do rio. O leito do rio é rochoso e muito irregular. A montante de S10 observou-se águas mais calmas e declividades amenizadas. Observou-se a formação de um grande bolsão de água, devido à uma rocha graúda que está localizada na margem esquerda do rio Piabanha, a montante de S10. A jusante verificou-se um trecho encachoeirado, devido à diminuição da largura da calha no nível da água e à declividade ser acentuada.

Constatou-se neste trecho margens bem vegetadas, com a presença de algumas casas próximas a margem direita. Não se verificou lixo sendo transportado pelo escoamento, mas há depósitos de lixo na margem direita do rio Piabanha.

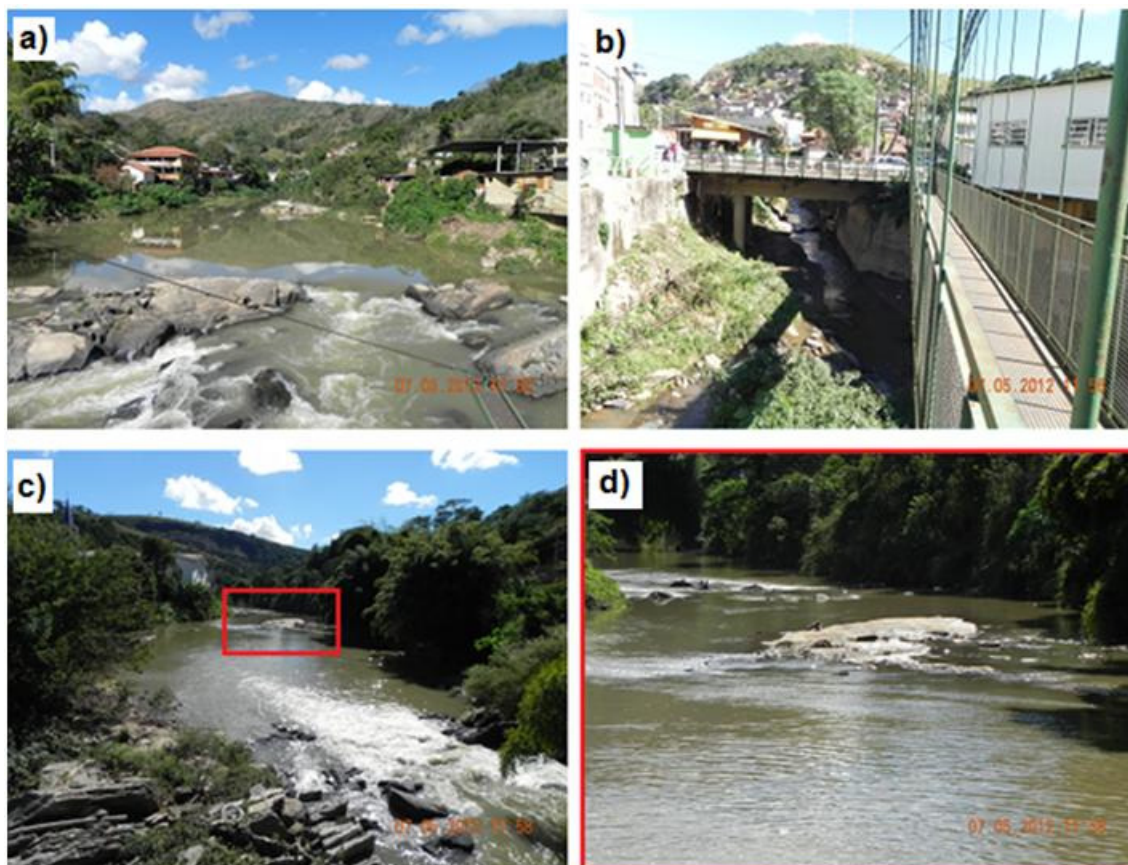
Tendo em vista que este ponto está na divisa entre dois trechos com declividades diferentes, cabe ressaltar que este foi um ponto importante e utilizado na modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha. As fotos tiradas neste trecho estão apresentadas na **Figura 64**.



**Figura 64:** Fotos tiradas de montante e de jusante de S10, respectivamente.

A jusante de S10, aproximadamente 2,2 km, está localizado o próximo ponto escolhido para a descrição, P36. Neste ponto, há a confluência do rio do Cedro com o Piabanha, pela margem esquerda. Observou-se uma grande quantidade de rochas próximas a confluência dos dois rios. O leito do escoamento é arenoso, a jusante e a montante de P36, apresentando em alguns pontos depósitos consolidados de sedimentos. Não foi verificado o transporte de lixo pelo escoamento, mas há depósitos

significativos de lixo nas margens. Constatou-se a presença de vegetação e de muitas casas nas margens do rio Piabanha e na cabeceira do rio do Cedro. Sua água apresentou coloração cinza, sem odor desagradável. A **Figura 65** ilustra o que foi descrito para este trecho do afluente e do rio Piabanha.



**Figura 65:** a) Foto tirada de P36, visão de montante do rio Piabanha; b) Visão do rio do Cedro, a montante da confluência; c) Visão do rio Piabanha, a jusante da confluência; d) Banco de areia formado a jusante da confluência.

O próximo ponto escolhido para se realizar a descrição está localizado na confluência do rio Preto com o rio Piabanha. Este ponto, P37, está a 800 metros de distância a jusante de P36. O rio Preto, por sua vez, foi considerado na modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha, por apresentar contribuição importante de vazão.

Neste ponto, observou-se que a coloração da água do rio Preto é escura, visualmente cinza-amarronzada. A coloração da água do Piabanha é barrenta, aparentemente com uma grande carga de sedimentos finos em suspensão sendo transportados. Verificou-se também a presença de rochas no leito do Piabanha, próximo à confluência com o rio Preto. Não se constatou o transporte de lixo pelo escoamento

em ambos os rios, mas há depósitos significativos de lixo nas margens do Preto e do Piabanha. Observou-se a presença de vegetação e de muitas casas próximas as margens do rio Preto e do Piabanha. A **Figura 66** ilustra o que foi dito para este trecho.



**Figura 66: Confluência do rio Preto com o rio Piabanha.**

O próximo e último ponto analisado nesta campanha de campo foi o S11, que está localizado a jusante de P37, aproximadamente 5,4 km. Cabe ressaltar que este ponto foi utilizado como seção de monitoramento da campanha de campo com o uso de traçadores fluorescentes e na modelagem hidrodinâmica com o HEC-RAS, sendo o ponto mais a jusante do trecho modelado.

O leito do escoamento neste trecho é arenoso, apresentando, a montante, um ponto de depósito consolidado de areia na margem esquerda do Piabanha. Observou-se também a presença de rochas graúdas no leito e nas margens do escoamento. A jusante deste ponto, aproximadamente a 200 metros, o rio Piabanha começa a sofrer remanso devido à barragem da PCH Piabanha. Não foi verificada a presença de lixo sendo transportado pelo escoamento, nem há depósitos significativos nas margens. O lixo foi encontrado apenas em marcas recentes de cheia, cerca de 2,0 metros acima do nível da água do dia 05/07/2012. Neste trecho constatou-se a presença de uma régua linimétrica da empresa de energia QUANTA, que administra a geração de energia nas barragens do Piabanha e de Areal (Barragem Morro Grande). As fotos tiradas neste trecho estão apresentadas na **Figura 67**.

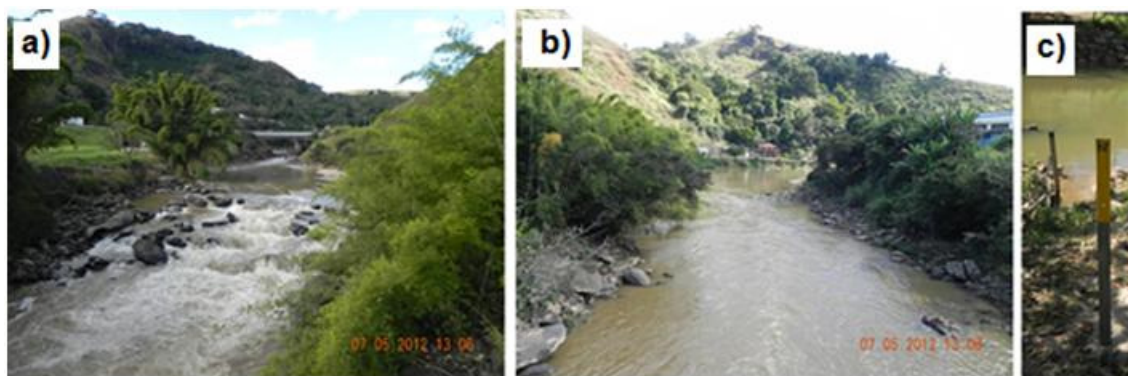


Figura 67: a) Vista de montante de S11; b) Vista de jusante de S11; c) Régua linimétrica da empresa de energia QUANTA.

#### 4.3. CAMPANHAS DE MONITORAMENTO

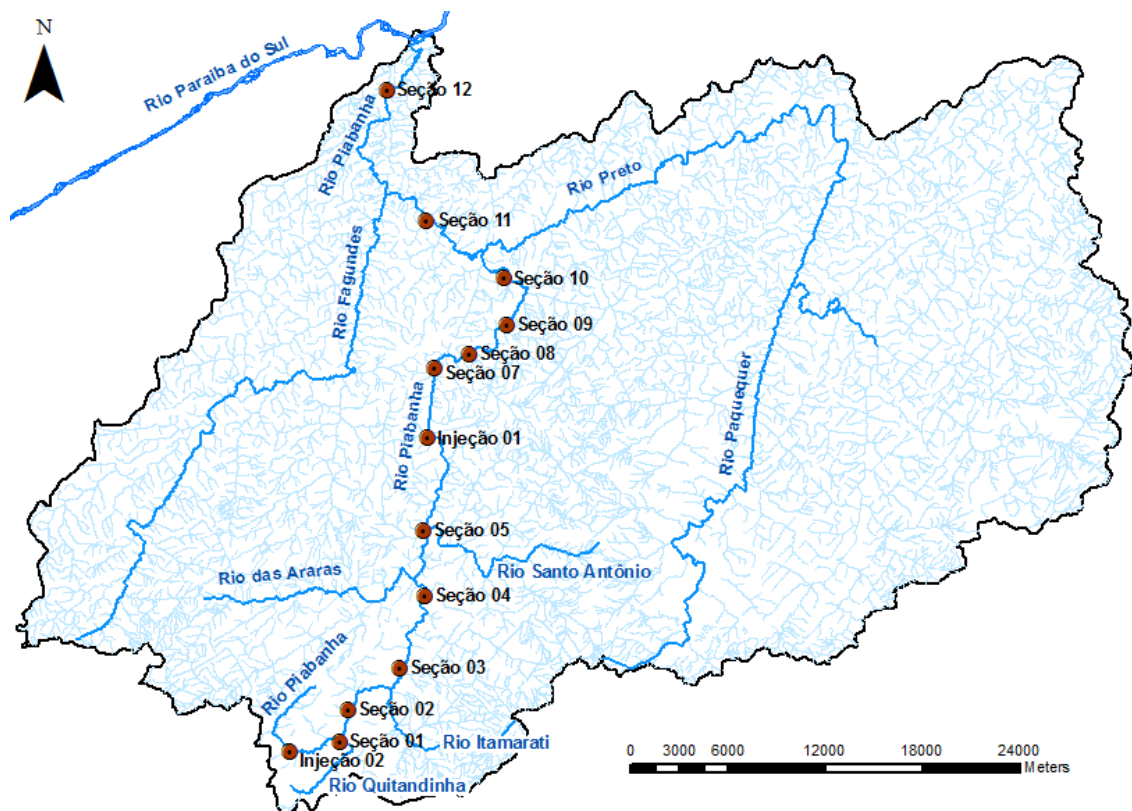
Buscou-se realizar as campanhas de campo com o uso de traçadores fluorescentes em uma data correspondente ao calendário de monitoramento de outras equipes, por exemplo: da CPRM, que realizaria medições de parâmetros hidráulicos; do INEA, que coletavam amostras de água para análises laboratoriais da qualidade de água; e da equipe de profissionais da biologia da UFRJ, que tinha o objetivo de verificar a população aquática do rio Piabanha e utilizá-la como indicativo da qualidade da água. Assim, a união de diferentes equipes na mesma data teve como objetivo de formar uma base consolidada de dados.

Contudo, por problemas logísticos não foi possível mobilizar todas as equipes de monitoramento do rio Piabanha em uma mesma data, tornando assim inadequado a utilização dos dados hidráulicos medidos pela CPRM neste trabalho.

#### 4.4. ENSAIO COM TRAÇADORES

Os ensaios de campo com o uso de traçadores fluorescentes foram realizados, principalmente, com o intuito de avaliar as características de dispersão e transporte do rio Piabanha. Assim, algumas precauções foram tomadas. Primeiramente, uma visita prévia ao local de estudo foi necessária e com a ajuda do *Google Earth* e de trabalhos de pesquisa já realizados no rio Piabanha, pode-se colher dados quantitativos e qualitativos para caracterização da área e escolha das seções utilizadas no estudo.

O trecho do rio Piabanha escolhido para ser estudado possui, aproximadamente, 69 km de extensão e está compreendido entre os municípios de Petrópolis e Areal. Desta forma, o planejamento do ensaio de campo, que foi realizado por meio do modelo analítico de Taylor, foi extremamente importante, pois pôde-se concluir que o trabalho de campo deveria ser realizado em duas campanhas. Assim, o trecho escolhido para o estudo foi dividido em duas partes, sendo elas nomeadas como trecho superior, entre Petrópolis e Pedro do Rio, e trecho inferior, entre Pedro do Rio e Areal. As **Figuras 68** e **69** demonstram, respectivamente, a localização das seções no rio Piabanha e um diagrama unifilar, que contempla informações das contribuições laterais e das distâncias entre as seções de monitoramento e os pontos de injeção de traçador fluorescente.



**Figura 68:** Mapa da bacia do rio Piabanha, indicando a localização das seções do experimento de campo.

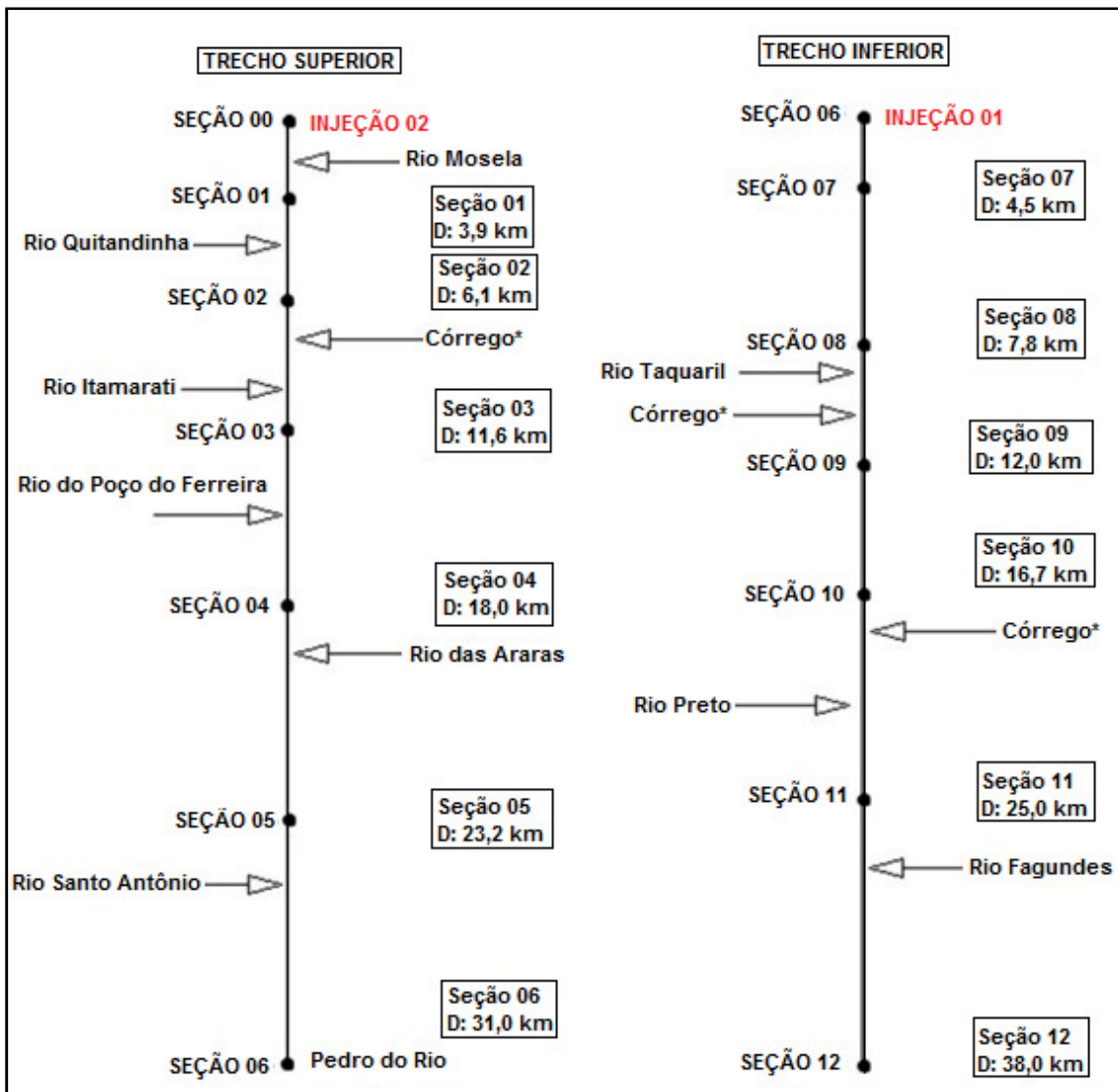


Figura 69: Diagrama unifilar das seções estudadas do rio Piabanha. Algumas contribuições laterais foram identificadas como Córrego\*, pois não se obteve seus respectivos nomes.

A divisão do rio Piabanha em dois trechos para a realização deste ensaio se deu devido a muitos motivos, dentre eles se destacam: a grande diferença de vazões entre os trechos, a pequena vazão observada na parte superior do trecho e a grande extensão da área de estudo.

Os trechos, superior e inferior, do rio Piabanha possuem extensões aproximadas de 31 e 38 km, respectivamente, totalizando assim em 69 km de extensão a área de estudo, como foi visto anteriormente.

Ainda na fase do planejamento foi decidido que o primeiro ensaio seria na parte inferior do rio Piabanha, pois assim, não haveria chances de sobreposição de traçador,

isto é, caso o trecho superior fosse o primeiro a ser estudado, o traçador fluorescente lançado poderia interferir nos resultados da campanha no trecho inferior, e para garantir que isso não ocorresse, seria necessário esperar todo um dia para que o traçador passasse por completo pelo trecho inferior e, assim, iniciar o ensaio no segundo trecho.

Após decisão de dividir a área estudada em dois trechos, utilizou-se novamente a equação de Taylor para estimar a massa de traçador a ser utilizada nos ensaios, assim como o tempo que a nuvem de traçador levaria para alcançar e passar pelas seções de monitoramento a jusante.

Para ambos os trechos (superior e inferior) foram escolhidos sete pontos, sendo um para injeção de traçador e os outros seis para serem seções de monitoramento. Em particular, buscou-se obter distâncias similares entre os pontos escolhidos.

No trecho superior foi realizada a segunda injeção, denominada “Injeção 2”. A “Seção 01” foi o primeiro ponto escolhido para coleta das amostras. Esta seção de monitoramento está localizada a, aproximadamente, 3,9 km de distância a jusante do ponto de lançamento do traçador fluorescente. Nela foram coletadas amostras em duas verticais diferentes, com um intervalo de 2,5 minutos.

Assim como na “Seção 01”, na “Seção 02” também foram coletadas amostras em duas verticais diferentes, porém, com um intervalo de tempo de 5 minutos. A “Seção 02” está localizada a uma distância de 6,1 km, aproximadamente, do local de injeção.

O próximo ponto escolhido para coleta de amostras foi a “Seção 03”, que fica a uma distância de 11,6 km, aproximadamente, a jusante do local de lançamento do traçador. A coleta de amostras foi inicialmente realizada de 5 em 5 minutos, porém a nuvem de traçador estava tardando muito para chegar à seção. Assim, o tempo de espera entre uma coleta e outra aumentou para 10 minutos. Nesta seção foi realizada apenas uma vertical, sendo ela no centro do rio Piabanha.

A próxima seção de monitoramento foi a “Seção 04”, que está localizada a jusante do ponto de injeção, a uma distância de, aproximadamente, 18 km. Nesta seção foram realizadas amostragens em apenas uma vertical de 10 em 10 minutos.

Enquanto era realizada a coleta das amostras na “Seção 04”, ocorreu uma chuva muito forte que elevou rapidamente o nível da água no rio Piabanha, fazendo com que a coleta de amostras nas duas seções mais a jusante, “Seção 05” e “Seção 06”, fosse prejudicada. Isto se deu devido ao grande volume de água que foi acrescido ao rio,



levando a uma diluição acentuada do traçador fluorescente. Adicionalmente o pré-dimensionamento ficou inadequado, pois levava em consideração uma vazão/velocidade muito inferior ao que estava ocorrendo nas condições observadas.

A “Seção 05” está localizada a uma distância de 23,2 km a jusante do ponto de injeção e não foi constatado traçador em suas amostras coletadas. As amostras foram coletadas em apenas uma vertical, no centro do rio Piabanha, de 10 em 10 minutos.

Por causa desta chuva intensa, na “Seção 06”, que está localizada a 31 km de distância a jusante do local de injeção, não se coletou amostras de água.

Abaixo, segue a **Tabela 6**, que apresenta um resumo de características das seções de monitoramento e do ponto de injeção para o trecho superior do rio Piabanha.

**Tabela 6: Localização e características das seções utilizadas no ensaio de campo com traçadores fluorescentes.**

Seções	Dist. (km) <sup>1</sup>	Nº de Vert. <sup>2</sup>	Nº de Amostras <sup>3</sup>	Coordenadas UTM WGS 84		Descrição
				E	N	
Injeção 2	0	0	0	0683886	7509520	Ponto próx. à confluência com o rio Avelá-Leman.
Seção 01	3,9	2	100	0686921	7510158	Ponte em frente ao Palácio de Cristal.
Seção 02	6,1	2	100	0687521	7512088	Ponte em frente ao Liceu Carlos Chagas.
Seção 03	11,6	1	50	0690689	7514618	Ponte da RJ134 com a rua Eng. Durval de Souza.
Seção 04	18,0	1	50	0692190	7519133	Ponte no acesso a Nogueira.
Seção 05	23,2	1	50	0692083	7523147	Ponte próx. a confluência com o rio Santo Antônio
Seção 06	31,0	0	0	0692364	7528830	Ponte sobre o rio Piabanha em Pedro do Rio.

<sup>1</sup>: Distância em relação ao ponto de injeção de traçadores fluorescentes.

<sup>2</sup>: Foram coletadas duas verticais nas duas primeiras seções para verificação da DBM. Nas seções 09, 10 e 11 foi coletada apenas 1 vertical. Na última seção não foi realizado a coleta de amostras.

<sup>3</sup>: Cada vertical foram coletadas 50 amostras, por consequência, as duas primeiras seções foram coletadas 100 amostras.

No trecho inferior, onde foi realizada a “Injeção 1”, o primeiro ponto escolhido para amostragem foi a “Seção 07” que fica aproximadamente a 4,5 km de distância a jusante do ponto de injeção. Neste ponto foram realizadas coletas de amostras de água de 5 em 5 minutos. Nesta seção foram coletadas amostras em duas verticais diferentes, sendo elas próximas às margens.

O próximo ponto, “Seção 08”, está localizado a 7,8 km de distância a jusante do ponto de injeção. Neste ponto, assim como na “Seção 07”, foram realizadas amostragens de 5 em 5 minutos em duas verticais.

As seções de monitoramento “Seção 09” e “Seção 10” estão localizadas a 12,0 km e 16,7 km, respectivamente, a jusante do ponto de injeção. Nestas seções foram realizadas amostragens em apenas uma vertical, isto é, no centro do rio. Estas amostragens foram feitas com intervalos de 5 minutos.

O próximo ponto a jusante escolhido para amostragem foi a “Seção 11”, que está localizada a 25,0 km de distância do local de lançamento do traçador. Nesta seção foram coletadas amostras em apenas uma vertical, assim como nas duas seções anteriores, porém com intervalos de 10 minutos.

A próxima e última seção escolhida para amostragem foi a “Seção 12”, mas, com o auxílio do fluorímetro de campo, observou-se, *in situ*, que a concentração de traçador fluorescente nas amostras coletadas na “Seção 11” estava muito baixa, e como há um reservatório entre as “Seções 11 e 12”, decidiu-se abandonar a última seção do experimento, pois se estimou uma demora expressiva na chegada do traçador na seção. Adicionalmente, uma diluição muito grande, devido ao grande volume de água retido no reservatório resultaria em uma fluorescência muito baixa para realizar leitura no equipamento.

A seguir, a **Tabela 7** apresenta um resumo de características das seções de monitoramento e do ponto de injeção para o trecho inferior do rio Piabanha.

**Tabela 7: Localização e características das Seções de monitoramento.**

Seções	Dist. (km) <sup>1</sup>	Nº de Vert. <sup>2</sup>	Nº de Amostras <sup>3</sup>	Coordenadas UTM		Descrição
				WGS 84		
Injeção 1	0	0	0	E	0692364	Ponte sobre o rio Piabanha em Pedro do Rio.
				N	7528830	
Seção 07	4,5	2	100	E	0692768	Ponto chamado de ponte quebrada de Areal.
				N	7533144	
Seção 08	7,8	2	100	E	0694940	MANAAIM.
				N	7534019	
Seção 09	12,0	1	50	E	0697238	Estação Posse 1, próx. à Escola Municipal Beatriz.
				N	7535843	
Seção 10	18,0	1	50	E	0697185	Rua Manoel Fernandes. Bairro Pedreira.
				N	7538969	
Seção 11	25,0	1	50	E	0692303	Ponte paralela a BR040, lado esquerdo a jusante.
				N	7542263	
Seção 12	38,0	0	0	E	0689848	Ponto localizado próximo a Estação Linimétrica.
				N	7550309	

<sup>1</sup>: Distância em relação ao ponto de injeção de traçadores fluorescentes.

<sup>2</sup>: Foram coletadas duas verticais nas duas primeiras seções para verificação da DBM. Nas seções 09, 10 e 11 foi coletada apenas 1 vertical. Na última seção não foi realizado a coleta de amostras.

<sup>3</sup>: Cada vertical foram coletadas 50 amostras, por consequência, as duas primeiras seções foram coletadas 100 amostras.

#### 4.4.1. EXPERIMENTO DE CAMPO

O experimento de campo foi dividido em duas campanhas, como foi explicado no subitem 4.4. A primeira campanha de campo foi realizada no trecho inferior do rio Piabanha, sendo iniciada às 05:30 horas do dia 20/03/2012 com uma injeção instantânea. Nesta injeção foram utilizados dois traçadores fluorescentes diferentes, Amidorodamina G e Uranina, que foram lançados ao mesmo tempo no meio da calha do rio Piabanha, de uma ponte principal em Pedro do Rio. Suas massas foram de 200g e 120g, respectivamente, diluídos em 5 litros de água. A segunda campanha de campo, no trecho superior, teve seu início no dia 22/03/2012 às 05:30 horas, sendo injetados de maneira instantânea os mesmos traçadores fluorescentes, Amidorodamina G e Uranina, cujas massas foram de 100g e 70g, respectivamente, diluídos em 5 litros de água. A Injeção foi realizada na parte central da calha do rio, de uma ponte sobre o rio Piabanha, próxima a confluência com o rio Avelá-Leman, no município de Petrópolis.

Na **Figura 70** é apresentado como foi feita a injeção instantânea no trecho superior do rio Piabanha.



**Figura 70:** Fotos que ilustram o momento da injeção instantânea na ponte sobre o rio Piabanha próxima à confluência com o rio Avelá-Leman.

O monitoramento do deslocamento da nuvem de traçador foi realizado a partir das seções de monitoramentos, que eram locais fixos e pré-determinados, como foi mostrado no subitem 4.4. A **Figura 71** ilustra o momento da coleta da amostra de água e a transferência para o recipiente.



**Figura 71: Momento da coleta da amostra de água e a transferência da mesma para o recipiente na “Seção 08”, respectivamente.**

Todos os frascos estavam devidamente identificados com etiquetas contendo informações como: número da amostra; hora e data da coleta; vertical a qual pertence; nome da seção de monitoramento. Cabe ressaltar ainda que os frascos eram escuros para evitar o fotodecaimento do traçador. Também foi adicionado aproximadamente 1mL de clorofórmio nas amostras, no momento da transferência para os frascos, que serve como agente bactericida e não reage com os traçadores. Podemos ver algumas ilustrações do que foi descrito neste parágrafo na **Figura 72**.



**Figura 72:** a) passagem da água coletada para o frasco devidamente identificado; b) Clorofórmio sendo adicionada à amostra.

Feito isto, utilizou-se o fluorímetro de campo (Turner T-10AU) equipado com célula de medição discreta e filtros adequados para detecção do traçador fluorescente Amidorodamina G. Desta forma foi possível detectar o início e o final da curva de passagem da nuvem de traçador em cada uma das seções de monitoramento, bem como antecipar ou adiar o horário pré-dimensionado de movimentação de uma equipe para a próxima seção. A **Figura 73** ilustra como é feita a detecção de traçadores fluorescentes *in situ*.



**Figura 73:** Procedimento para leitura das amostras *in situ*.

Após ler as amostras com o fluorímetro de campo, os resultados foram anotados em uma planilha para se ter o controle das fluorescências encontradas nas amostras.

Identificado o traçador, a amostra era fechada e guardada no engradado, que possui capacidade para 50 amostras e serve para organizar e transportar as amostras coletadas, **Figura 74**.



**Figura 74:** Porrete utilizado para fechamento das amostras e os engradados contendo as amostras coletadas em duas verticais na "Seção 02".

#### 4.4.2. ANÁLISE DE LABORATÓRIO

A análise das amostras coletadas em campo foi realizada no Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ com um espectrofluorímetro (Shimadzu RF5301) (**Figura 75**), que possui a capacidade de avaliar a fluorescência dos dois traçadores fluorescentes, Amidorodamina G e Uranina, contidos na amostra, simultaneamente.

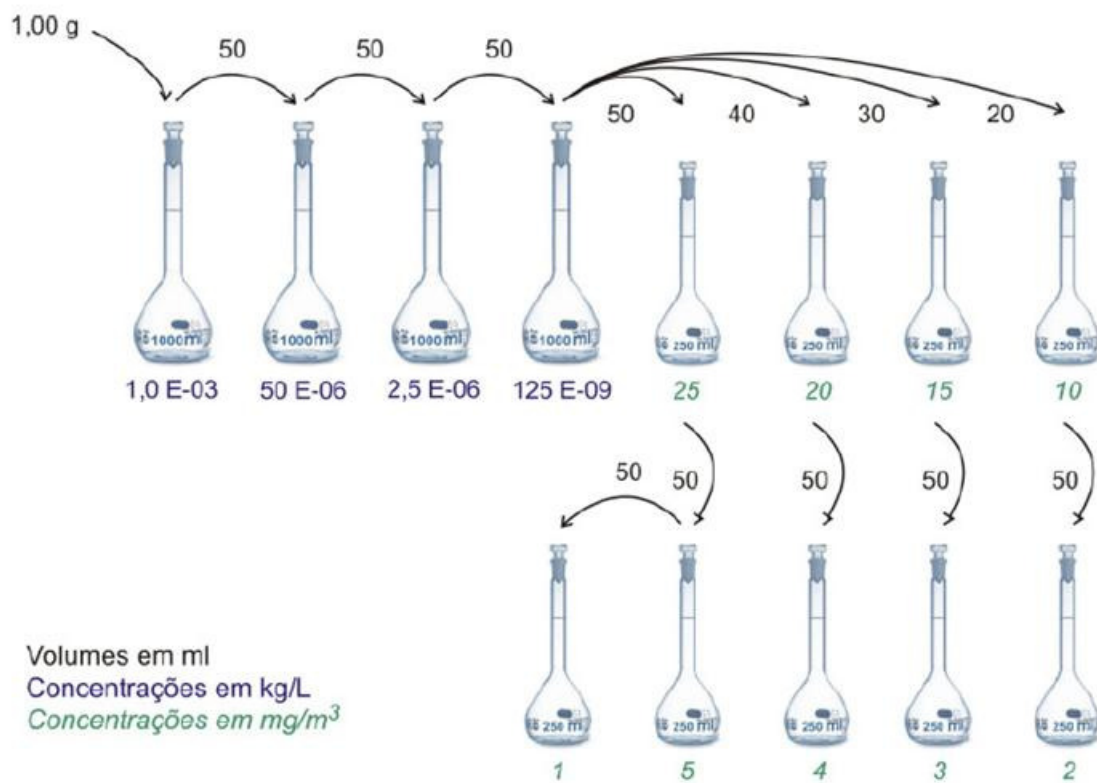


**Figura 75:** Espectrofluorímetro utilizado para leitura das amostras de traçadores fluorescentes.

Antes de se analisar as amostras coletadas no experimento em campo, é necessário se realizar um procedimento de calibração. Este procedimento consiste em



um processo de diluição de amostras (**Figura 76**) contendo traçador fluorescente e água colhida no local de estudo até obter amostras com concentrações-padrão (conhecidas). As amostras preparadas possuíam concentrações de: 0,0; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0 e 20,0 $\mu\text{g/L}$ . As medições fluorimétricas das diluições-padrão permitiram estabelecer retas de calibração, que relacionam a concentração, em  $\text{mg/m}^3$ , com a fluorescência de cada uma das amostras com concentrações conhecidas. Assim, a partir da equação desta reta, o valor da concentração de cada amostra coletada em campo pôde ser obtido.



**Figura 76:** Procedimento de diluição dos traçadores fluorescentes.

Como o experimento de campo foi realizado com dois traçadores fluorescentes, foram utilizadas amostras contendo as concentrações indicadas no parágrafo anterior para cada um dos dois traçadores, obtendo assim uma reta de calibração para cada tipo de traçador.

#### 4.5. CAMPANHAS CONVENCIONAIS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE E TOPOBATIMETRIA

Um trabalho de campo foi realizado para fazer medições hidráulicas na calha principal do rio Piabanha. Estas medições serviram para o melhor conhecimento quantitativo das características hidráulicas do local de estudo. Por possuir uma extensão de aproximadamente 70 km, o rio Piabanha foi dividido em 20 pontos estratégicos para realização deste serviço. Por ser um trabalho extenso e demorado, programou-se realizar o levantamento de dados destas 20 seções em 3 diferentes campanhas. Contudo, devido às dificuldades encontradas, optou-se pela realização de apenas uma campanha de campo, com levantamento de 6 seções transversais, localizados na parte inferior do rio Piabanha, todas a jusante de Pedro do Rio. A escolha das seções a jusante para realização deste levantamento de campo se deu devido ao conhecimento da geometria de 4 seções a montante de Pedro do Rio, inclusive, apresentadas no estudo de LOU (2010). A localização e as informações destas 10 seções estão apresentadas na **Figura 77** e na **Tabela 8**. Cabe ressaltar que grande parte das seções escolhidas para este trabalho de campo são comuns ao ensaio com traçadores fluorescentes e também foram utilizadas no estudo com o modelo matemático HEC-RAS 4.1.

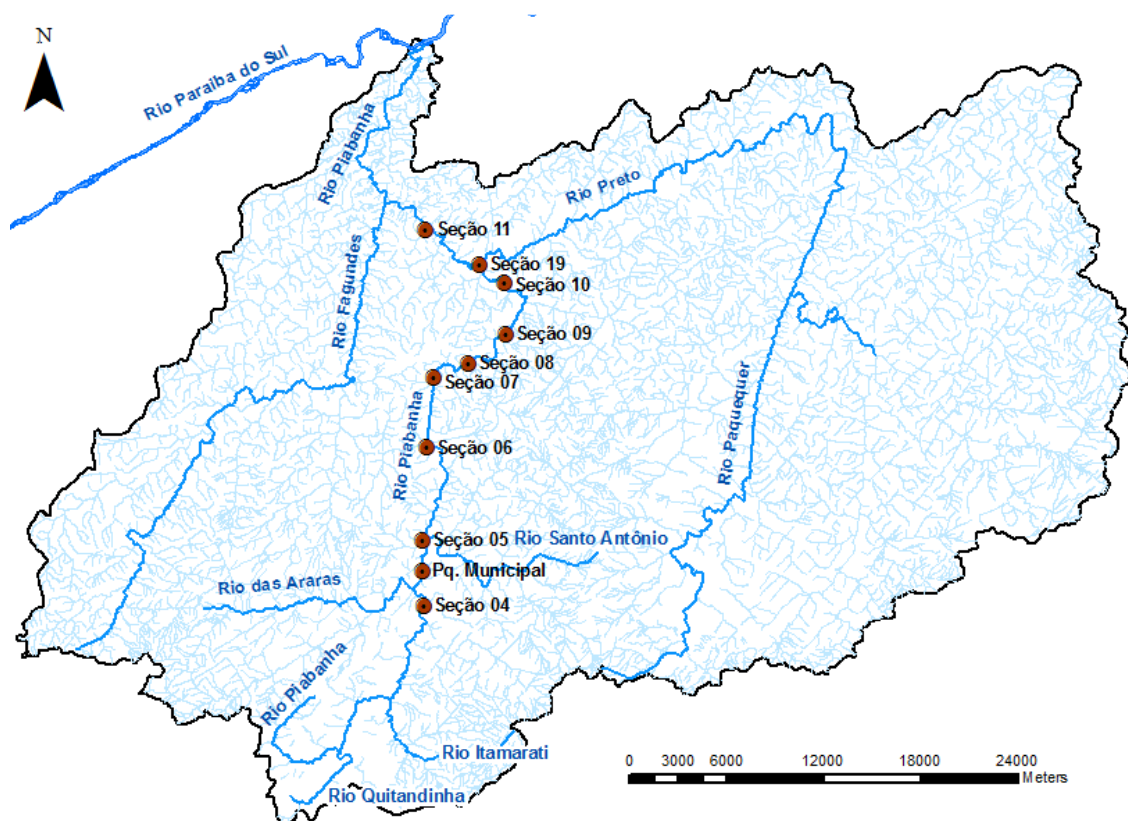


Figura 77: Mapa ilustrando os pontos que se conhece a geometria da seção transversal.

**Tabela 8: Localização e identificação das seções transversais que foram possíveis obterem dados da geometria.**

Nome (Pontos)	Coordenadas UTM		OBSERVAÇÕES
	WGS 84		
	E	N	
Seção 04 <sup>1</sup>	692190	7519133	Comum ao ensaio de traçadores e ao modelo HEC-RAS
Pq. Municipal <sup>1</sup>	692070	7521240	Comum ao modelo HEC-RAS
Seção 05 <sup>1</sup>	692083	7523147	Comum ao ensaio de traçadores e ao modelo HEC-RAS
Seção 06 <sup>1</sup>	692364	7528830	Comum ao ensaio de traçadores e ao modelo HEC-RAS
Seção 07 <sup>2</sup>	692768	7533144	Comum ao ensaio de traçadores e ao modelo HEC-RAS
Seção 08 <sup>2</sup>	694940	7534019	Comum ao ensaio de traçadores e ao modelo HEC-RAS
Seção 09 <sup>2</sup>	697238	7535843	Comum ao ensaio de traçadores e ao modelo HEC-RAS
Seção 10 <sup>2</sup>	697185	7538969	Comum ao ensaio de traçadores e ao modelo HEC-RAS
Seção 19 <sup>2</sup>	695632	7540079	Comum ao modelo HEC-RAS
Seção 11 <sup>2</sup>	692303	7542263	Comum ao ensaio de traçadores e ao modelo HEC-RAS

<sup>1</sup>: Seção transversal obtida no estudo de LOU (2010).

<sup>2</sup>: Seção determinada no trabalho de campo deste estudo.

Este estudo de campo foi realizado em dois dias (17 e 18/09/2012). Nele foram levantados dados da velocidade média, da geometria e da área da seção transversal. Para se medir a velocidade média utilizou-se um molinete modelo N-22066, uma hélice modelo N-8-267 e um conta-giros. Devido à profundidade de 5 das 6 seções atingirem valores superiores a necessária para a segurança do medidor, utilizou-se um barco para auxiliar nas medições hidráulicas. Também foi necessário a utilização de um guincho de fio de aço milimetrado, um lastro de 15 kg e um cabo guia para delimitar a transversal estudada. A **Figura 78** ilustra o molinete utilizado no trabalho de campo e a medição sendo realizada na Seção 11 do rio Piabanha, respectivamente.



**Figura 78: Foto ilustrando o molinete utilizado na campanha de campo e a equipe realizando as medições hidráulicas no rio Piabanha, respectivamente.**

A única seção que não necessitou do barco para realização da medição da velocidade média foi a Seção 10, que para tanto utilizou uma haste metálica milimetrada como suporte ao molinete. A medição nesta seção pode ser observada na **Figura 79**.



**Figura 79: Medição da velocidade na Seção 10 do rio Piabanha.**

A haste e o guincho milimetrados serviram não somente para posicionar o molinete na altura correta para a medição de velocidade em cada uma das verticais, mas também para se fazer toda a batimetria da seção transversal, conseguindo assim o detalhamento da calha principal do rio, bem como a profundidade, o raio hidráulico e a área da seção transversal.

Ainda neste trabalho de campo, a utilização de uma estação total possibilitou determinar a cota do nível da água e de pontos selecionados na extensão da calha do rio, acima da linha d'água, das 6 seções transversais estudadas neste trabalho de campo. As cotas determinadas estão amarradas a um marco (**Figura 80**) colocado no lado esquerdo do rio, que em seguida seria amarrado com um marco do IBGE. A **Figura 81** ilustra a estação total sendo utilizada para determinação da geometria na Seção 19.



**Figura 80: Marco utilizado na Seção 08 para determinação da cota da linha d'água e da geometria da calha do rio, acima do nível da água.**



**Figura 81: Foto tirada na Seção 19 quando se estava mirando o prisma, para se determinar a cota nos pontos selecionados da seção transversal.**

Contudo, a empresa contratada não forneceu os dados de elevação dos marcos de cada uma das seções transversais amarradas à um marco do IBGE, por problemas técnicos. Assim, utilizaram-se as cotas obtidas a partir do MDE, desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional da COPPE/UFRJ, para representaras 6 seções transversais medidas neste trabalho de campo e as 4 seções transversais obtidas no trabalho de LOU (2010). A seguir são apresentadas as 10 seções transversais do rio Piabanha utilizadas neste estudo e em apêndice segue a tabela de cada uma destas seções. Cabe ressaltar que as distâncias entre cada um dos pontos cotados foram tiradas em relação ao marco utilizado para o posicionamento da estação total, que foi posicionada a esquerda do rio em todas as seções transversais.

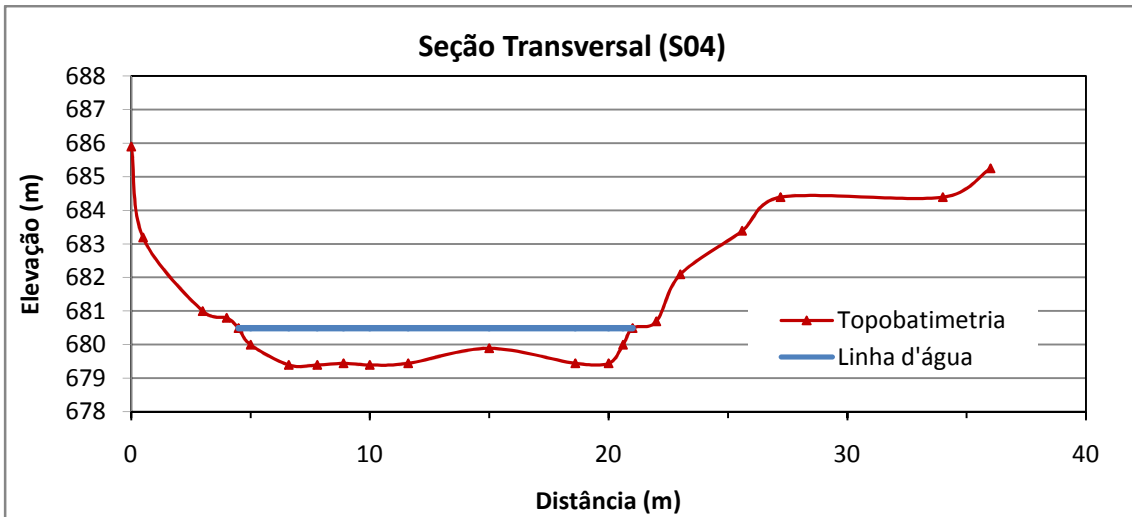


Figura 82: Topobathymetry da Seção Transversal (S04). Fonte: LOU (2010).

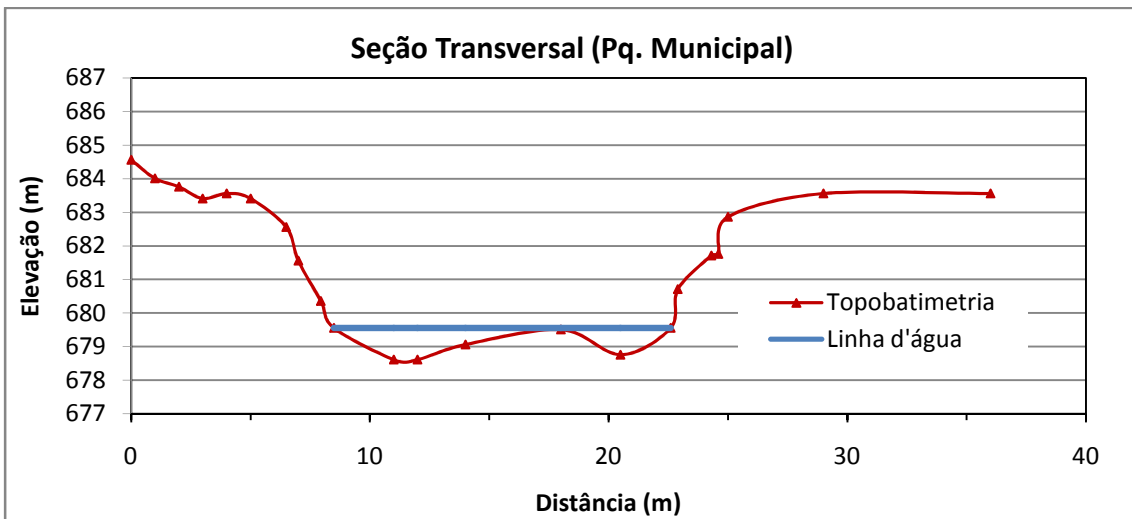


Figura 83: Topobathymetry da Seção Transversal (Parque Municipal). Fonte: LOU (2010).

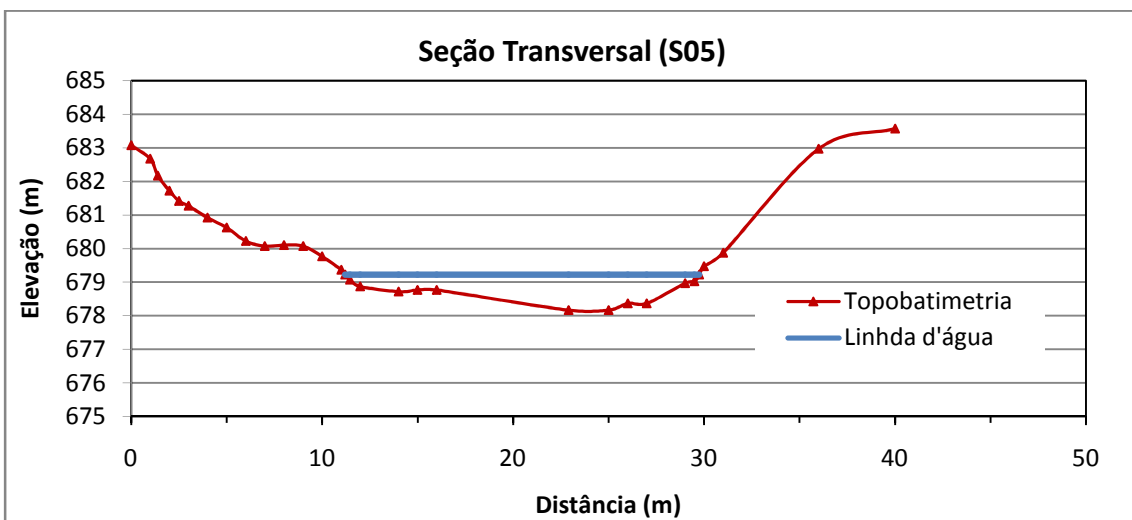


Figura 84: Topobathymetry da Seção Transversal (S05). Fonte: LOU (2010).

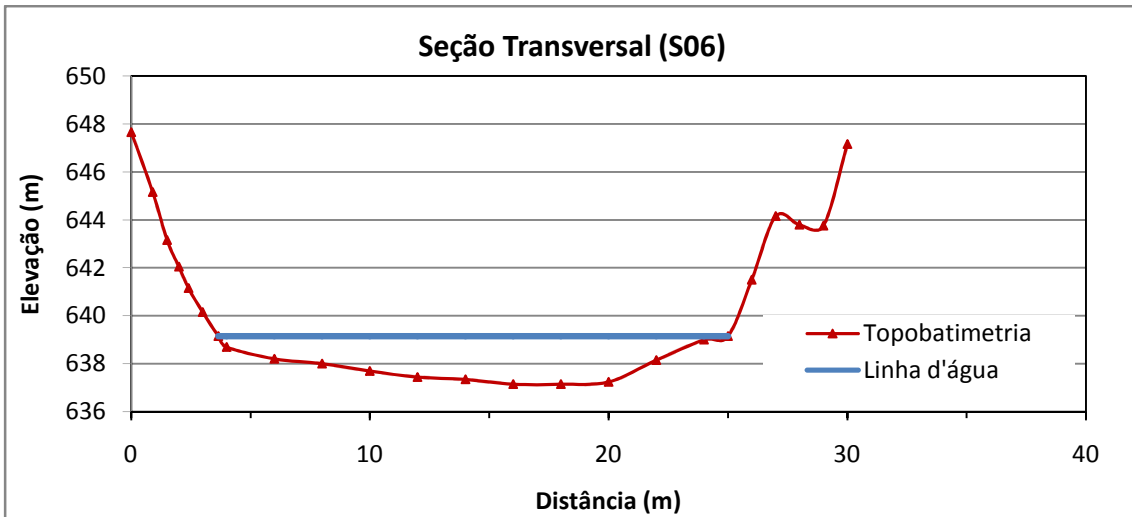


Figura 85: Topobatimetria da Seção Transversal (S06). Fonte: LOU (2010).

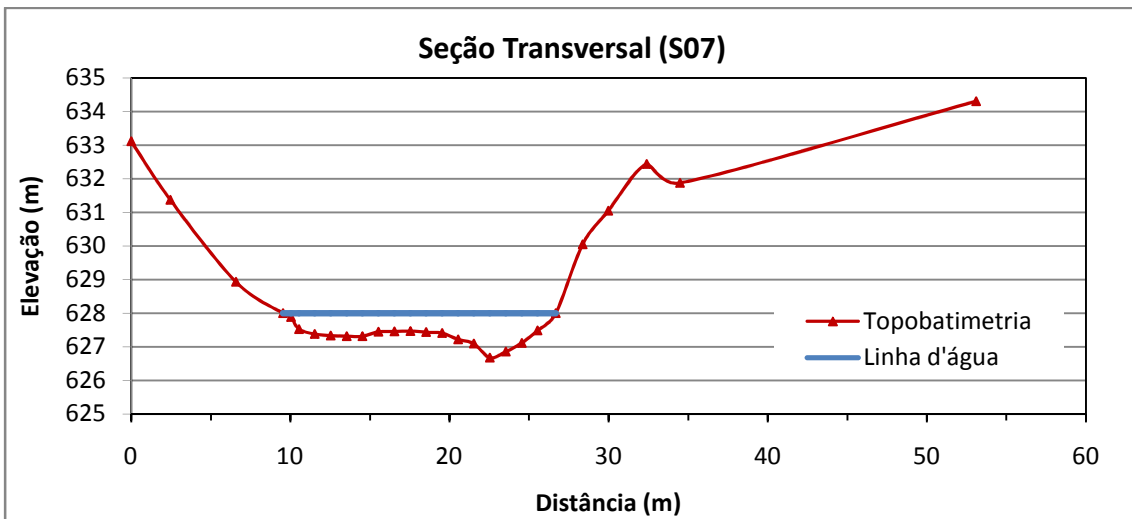


Figura 86: Topobatimetria da Seção Transversal (S07).

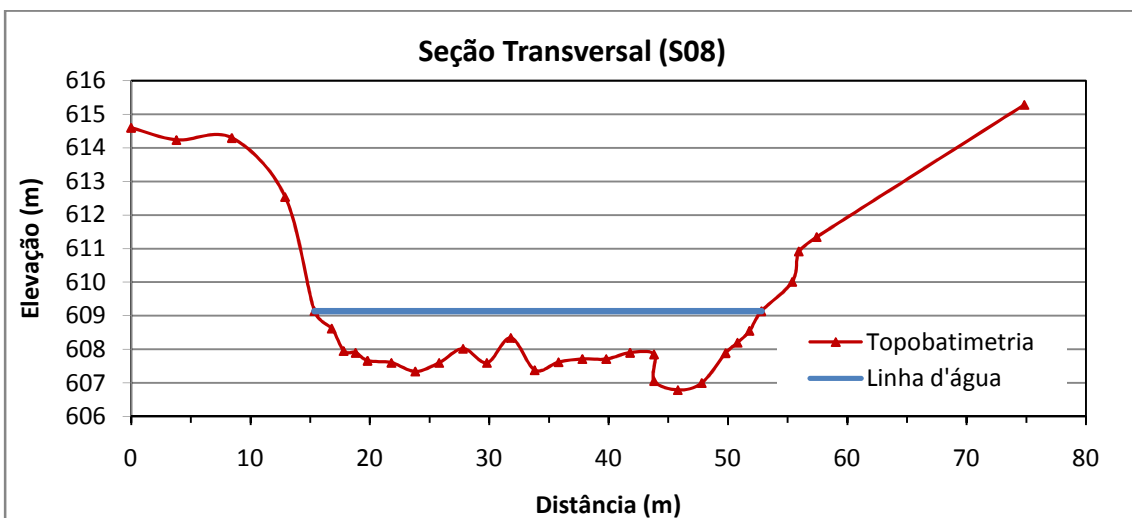


Figura 87: Topobatimetria da Seção Transversal (S08).

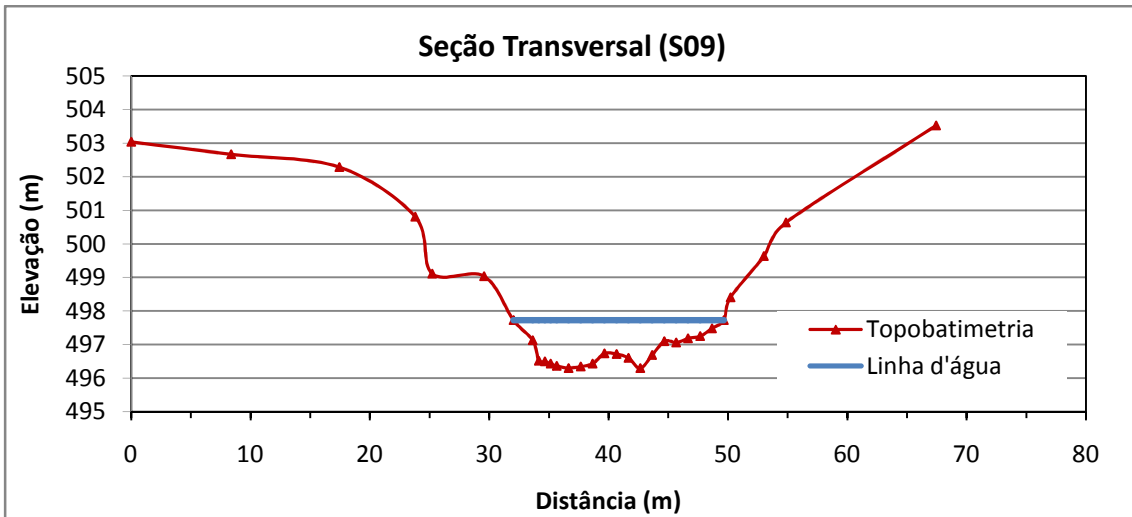


Figura 88: Topobathymetry da Seção Transversal (S09).

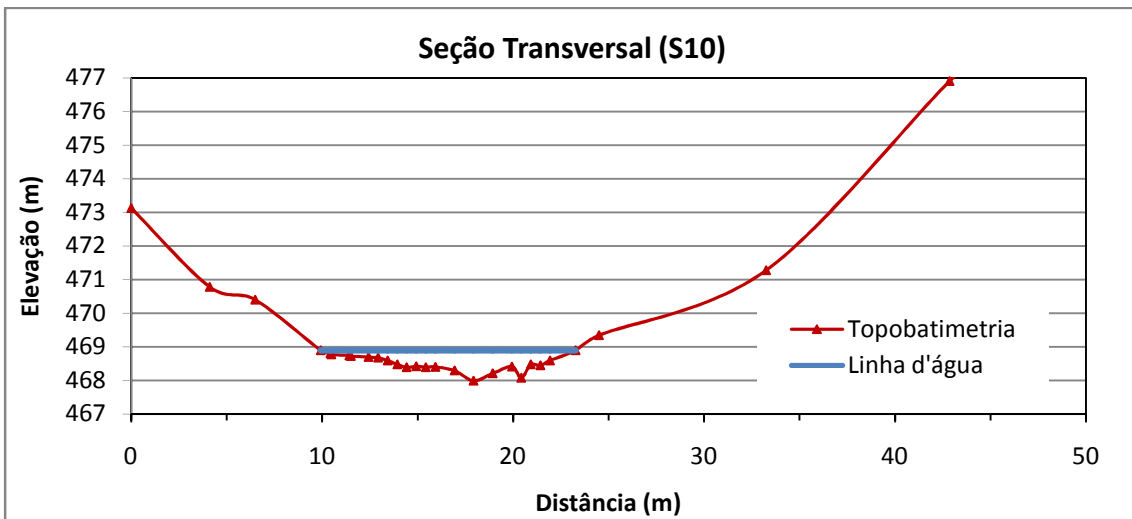


Figura 89: Topobathymetry da Seção Transversal (S10).

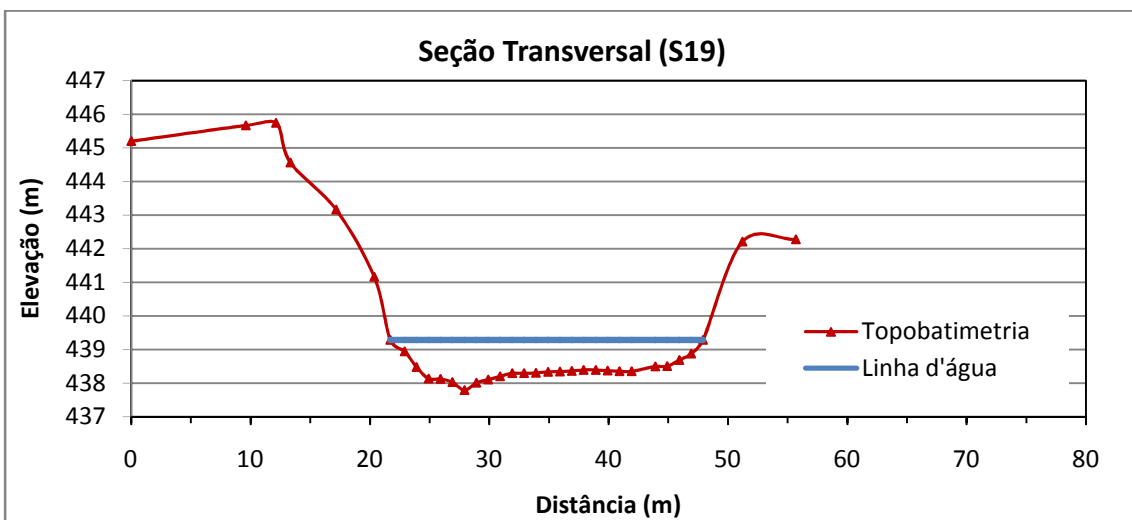
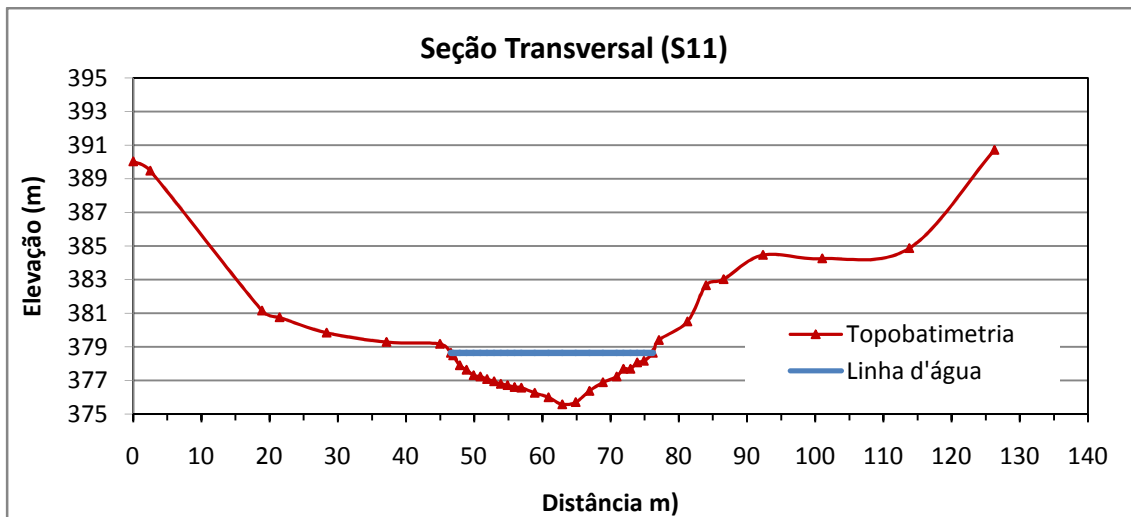


Figura 90: Topobathymetry da Seção Transversal (S19).





**Figura 91:** Topobatimetria da Seção Transversal (S11).

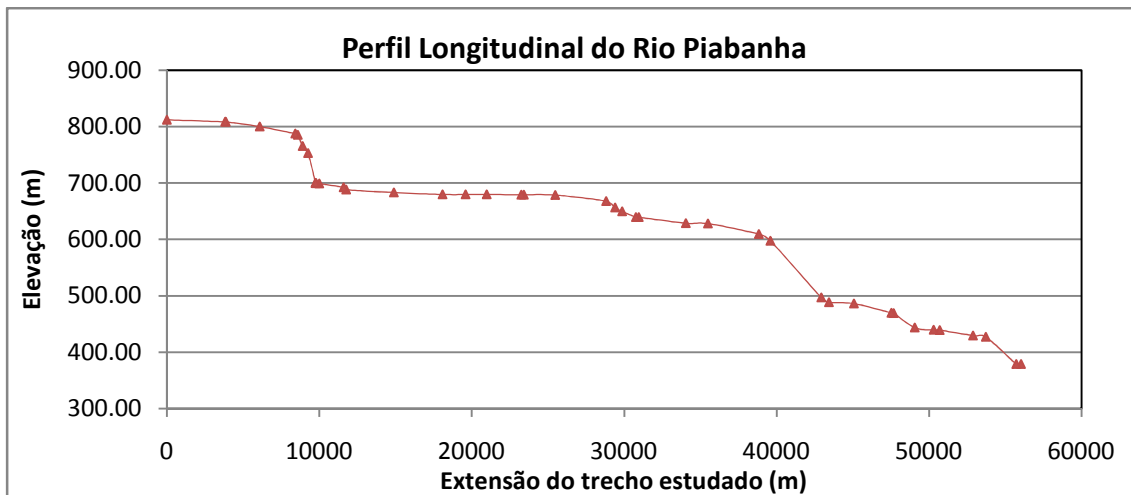
#### 4.6. UTILIZAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Neste subitem será exemplificado como foi realizado o estudo hidrodinâmico com o modelo matemático HEC-RAS 4.1 e a modelagem do transporte de uma substância passiva solúvel com o modelo analítico de Taylor.

##### 4.6.1. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

O HEC-RAS é um modelo matemático simples, que fornece como resultado dados de elevação do nível d'água e velocidade média por cada trecho. Algumas etapas foram seguidas para que a modelagem fosse realizada com êxito.

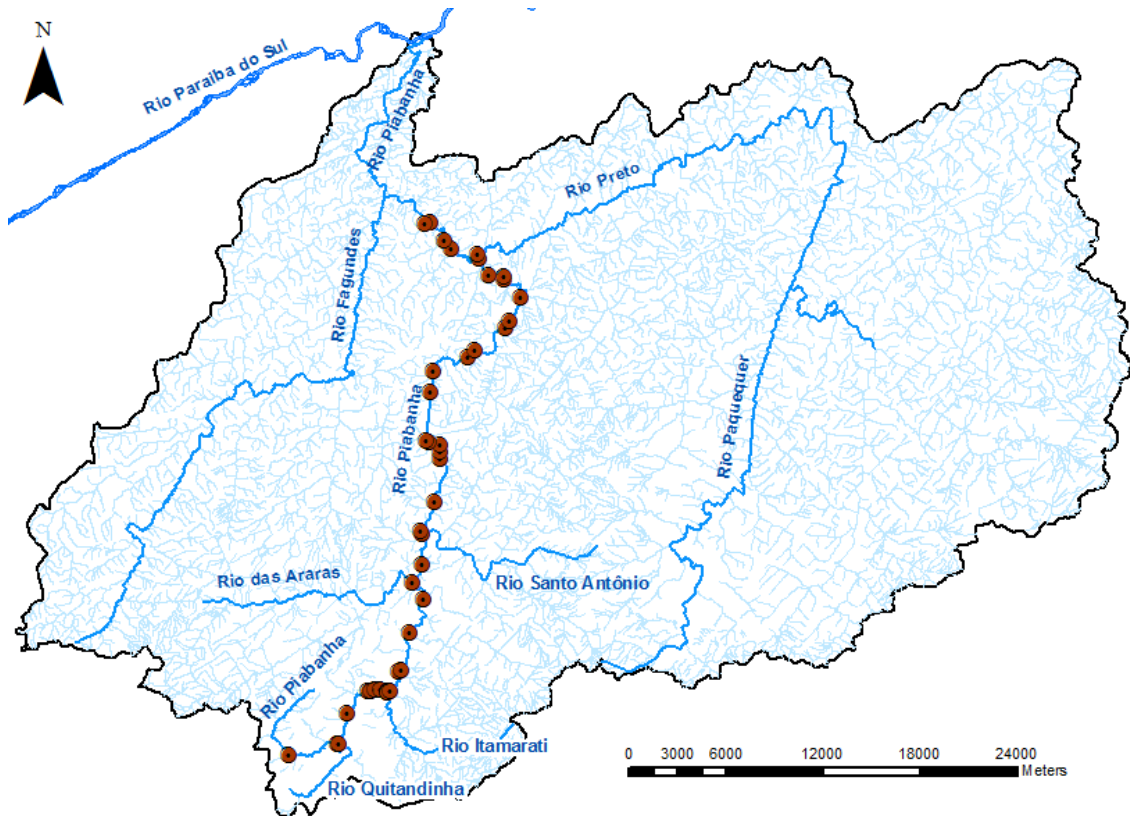
A modelagem computacional foi iniciada a partir da definição da geometria do rio, e para isto, foi utilizado o perfil longitudinal desenvolvido a partir do Modelo Digital de Elevação, que está apresentado na **Figura 92**.



**Figura 92: Perfil Longitudinal do rio Piabanha.**

Na definição da geometria do rio, adicionou-se ao modelo um reservatório (localizado em P18 do subitem 4.2) e cinco afluentes que possuem contribuições importantes ao rio Piabanha, sendo estes os rios Quitandinha, Itamarati, Rio das Araras, Santo Antônio e Preto. Estes afluentes serviram como condições de contorno para contribuições laterais de vazão no rio principal. Foram utilizadas 5 junções para se conectar os afluentes com o rio principal. O Piabanha ficou dividido em 7 trechos, devido às 5 junções e ao reservatório.

A próxima etapa foi de adicionar seções transversais aos trechos do modelo. Pode-se observar pelo perfil longitudinal que há trechos com declividades acentuadas, e para estes trechos, foram necessários um maior número de seções, para melhor representação da hidrodinâmica do rio Piabanha nas condições de escoamento do dia do ensaio de campo com o uso de traçadores fluorescentes. Cabe ressaltar que por necessidade do HEC-RAS, cada trecho deve conter no mínimo 2 seções transversais para que possa ser realizada a modelagem. Os pontos utilizados na modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha estão apresentadas na **Figura 93**.



**Figura 93: Pontos de controle utilizados na modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha.**

Para implementar o modelo hidrodinâmico, primeiramente adicionou-se as seções transversais com dados topobatimétricos, tendo cuidado em adicioná-las de jusante para montante. Após adicionar manualmente as seções transversais, uma ferramenta de interpolação do HEC-RAS foi utilizada para a construção das demais seções, levando sempre em consideração imagens do *GoogleEarth* e o que se mediu e viu nos trabalhos de campo.

Vale ressaltar que os dados adicionados a uma seção transversal são utilizados para modelar o trecho entre a mesma e a seção a jusante. Sendo assim, após adicionar a geometria da seção, adicionaram-se os valores de distância, sendo esta distância considerada entre as planícies de inundação, direita e esquerda, e a calha principal do rio, das duas seções. As distâncias entre as seções foram obtidas com o auxílio do *Google Earth*. A distância inserida na seção mais a jusante (Seção 11) foi de zero. Assim como na Seção 11, a primeira seção a montante de cada junção também foi adicionada distância zero, pois para estas seções, a distância deve ser inserida na caixa de edição das junções, devido à requisitos do HEC-RAS.

Os próximos passos foram adicionar os valores de contração e expansão, exemplificados no manual do HEC-RAS, e do coeficiente de Manning para cada trecho entre as seções de controle. Para tanto foi utilizada a tabela apresentada em CHOW (1973), que relata os valores do coeficiente de Manning para diferentes características em trechos de canais naturais.

Inseridos os dados de geometria, inicia-se a inserção dos dados de vazão e das condições de contorno do escoamento no modelo. O HEC-RAS possui a opção de escolha entre 4 condições de contorno, como apresentado no subitem 3.3.1.2. A condição de contorno utilizada neste estudo foi a *Know Water Surface Elevations*, que consiste em adicionar a cota da superfície da água no perfil que está sendo calculado.

Após inserção destes dados, o modelo hidrodinâmico HEC-RAS é capaz de simular o rio Piabanha. A modelagem pode ser realizada para analisar o escoamento subcrítico, supercrítico ou misto. Para o escoamento subcrítico, deve-se entrar com os dados de condição de contorno apenas na seção mais a jusante. No escoamento supercrítico, entra-se com a condição de contorno apenas nas seções a montante, do canal principal e dos afluentes. No escoamento misto, devem-se adicionar as condições de contorno nas seções de montante e de jusante.

Neste estudo foi utilizada a opção do escoamento misto para modelagem da calha principal do rio Piabanha. O programa realiza os cálculos primeiramente no regime subcrítico, isto é, tomando como base às condições de contorno a jusante. Caso ocorra alguma incoerência nos resultados obtidos pelo modelo para um determinado trecho do rio, o HEC-RAS automaticamente utiliza o módulo do fluxo supercrítico para realização do cálculo neste trecho. Após realização destes cálculos, o modelo avalia qual método obteve melhor resultado e continua o processo de cálculo nos próximos trechos com o método escolhido.

Assim, o rio Piabanha foi modelado pelo modelo hidrodinâmico HEC-RAS em situações de regime permanente com fluxo misto.

Os resultados obtidos pela modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha pelo HEC-RAS estão apresentados no subitem 5.2.1.

#### 4.6.2. MODELAGEM DE TRANSPORTE DE MASSA

Como foi dito no subitem 4.4, foram realizados ensaios com traçadores fluorescentes, e por meio destes ensaios pode-se determinar parâmetros hidráulicos importantes do rio Piabanha, como vazão, velocidade média e tempo de trânsito. De posse destes dados, utilizou-se o modelo analítico de Taylor para determinar o coeficiente de dispersão para cada trecho estudado do rio Piabanha.

Contudo, devido ao ensaio com traçadores fluorescentes não ter percorrido toda a extensão que era desejada neste estudo, não se pôde determinar o coeficiente de dispersão em alguns trechos. Para tanto, os valores do coeficiente de dispersão dos trechos vizinhos foram adotados com certos critérios para os trechos que não tiveram ensaios com traçadores fluorescentes.

Com isso, a partir dos dados hidráulicos obtidos com o modelo hidrodinâmico, pode-se estender o ensaio com traçadores fluorescentes para as seções que não foram estudadas durante o trabalho de campo e estimar a curva de concentração de um poluente solúvel passivo nesta determinada seção após um despejo acidental a montante.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão abordados os resultados obtidos nas duas campanhas de campo, referentes ao experimento de campo com traçadores fluorescentes e às medições convencionais de velocidade do escoamento. Em seguida, serão apresentados os resultados encontrados por meio do modelo numérico hidrodinâmico e do modelo analítico de transporte.

#### 5.1. EXPERIMENTO DE CAMPO

Foram realizadas duas campanhas de campo no ano de 2012, em diferentes épocas, neste estudo.

A primeira campanha foi realizada na segunda quinzena de março, cujo objetivo foi determinar as características hidráulicas e de transporte de um poluente solúvel passivo, com o uso da técnica de traçadores fluorescentes, em um trecho pré-determinado do rio Piabanha.

A segunda campanha de campo foi na segunda quinzena de setembro, e teve como objetivo realizar medições topobatimétricas de seções transversais do rio Piabanha, que estão apresentadas no subitem 4.5, e medições convencionais de velocidade do escoamento. Vale ressaltar que os dados de velocidade média e vazão líquida obtidos nas medições convencionais não foram utilizados neste estudo.

#### 5.1.1. TRAÇADORES FLUORESCENTES

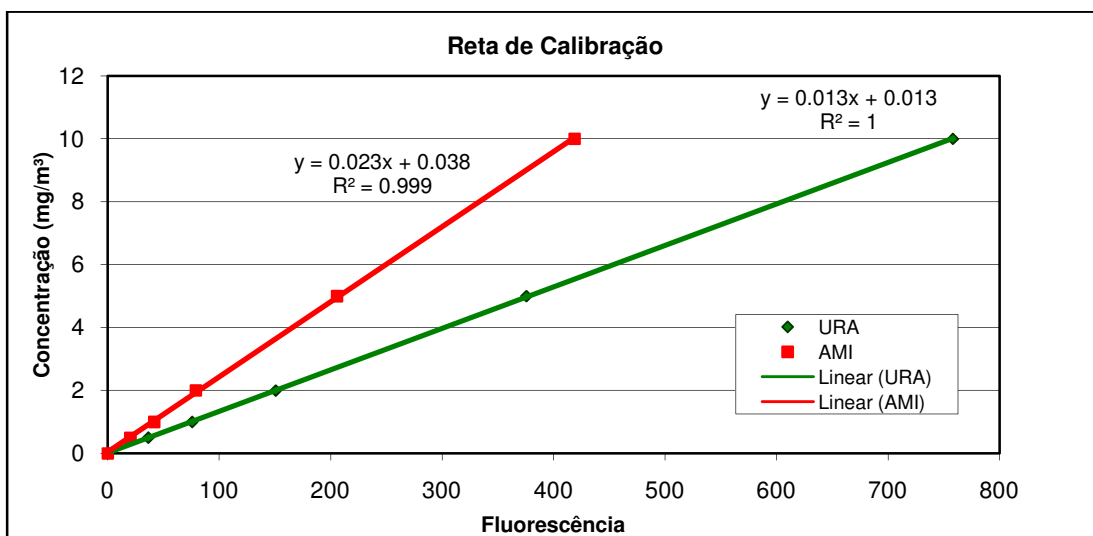
A campanha de campo com o uso de traçadores fluorescentes foi realizada para um trecho de aproximadamente 70 km de extensão no rio Piabanha, compreendido entre a confluência do rio Avelá-Leman com o Piabanha, na cidade de Petrópolis, e uma ponte localizada a 200 metros, aproximadamente, a montante do reservatório da PCH Piabanha, no município de Areal. O local de estudo foi dividido em dois trechos, na ponte principal de Pedro do Rio, que está localizado a aproximadamente 31 km a jusante da confluência do rio Avelá-Leman com o Piabanha. Assim, foram realizados dois ensaios de campo com traçadores fluorescentes. Os resultados obtidos para as duas campanhas de campo estão apresentados a seguir.

- SEGUNDA CAMPANHA

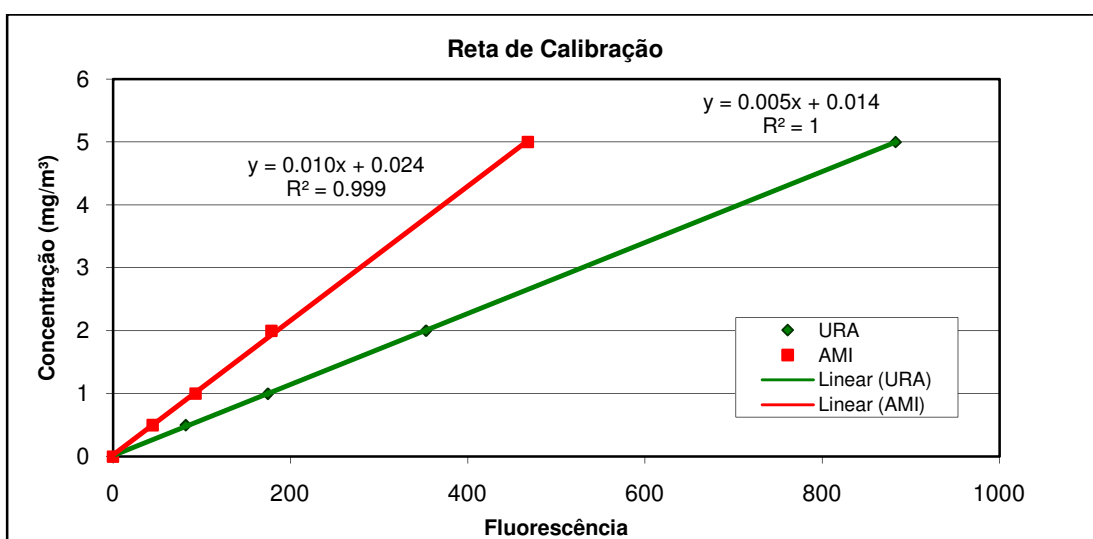
A segunda campanha foi no trecho superior do rio Piabanha, cuja injeção instantânea de traçadores fluorescentes foi feita na Seção 00 (Injeção 02), de uma ponte sobre a confluência entre os rios Avelá-Leman e o Piabanha, no dia 22/03/2012. Foi realizado o monitoramento da passagem da nuvem de traçador até a Seção 04. Não se obteve dados nas Seções 05 e 06, devido à forte precipitação ocorrida durante o ensaio e, por consequência, grande diluição dos traçadores. Adicionalmente, o aumento da vazão e da velocidade do rio Piabanha prejudicou o pré-dimensionamento do estudo, fazendo assim com que a nuvem de traçador passasse mais rapidamente do que o previsto nestas seções de monitoramento.

As amostras coletadas nas Seções 01, 02, 03 e 04 foram analisadas pelo espectrofluorímetro, com a finalidade de se obter os valores de suas fluorescências. Com o propósito de determinar a curva de passagem do traçador nas seções de monitoramento, montou-se retas de calibração do espectrofluorímetro, que transformam a fluorescência emitida pelos traçadores fluorescentes contidos na amostra em

concentração. As **Figuras 94** e **95** apresentam as retas de calibração utilizadas para as Seções 01 e 02 e Seções 03 e 04, respectivamente.

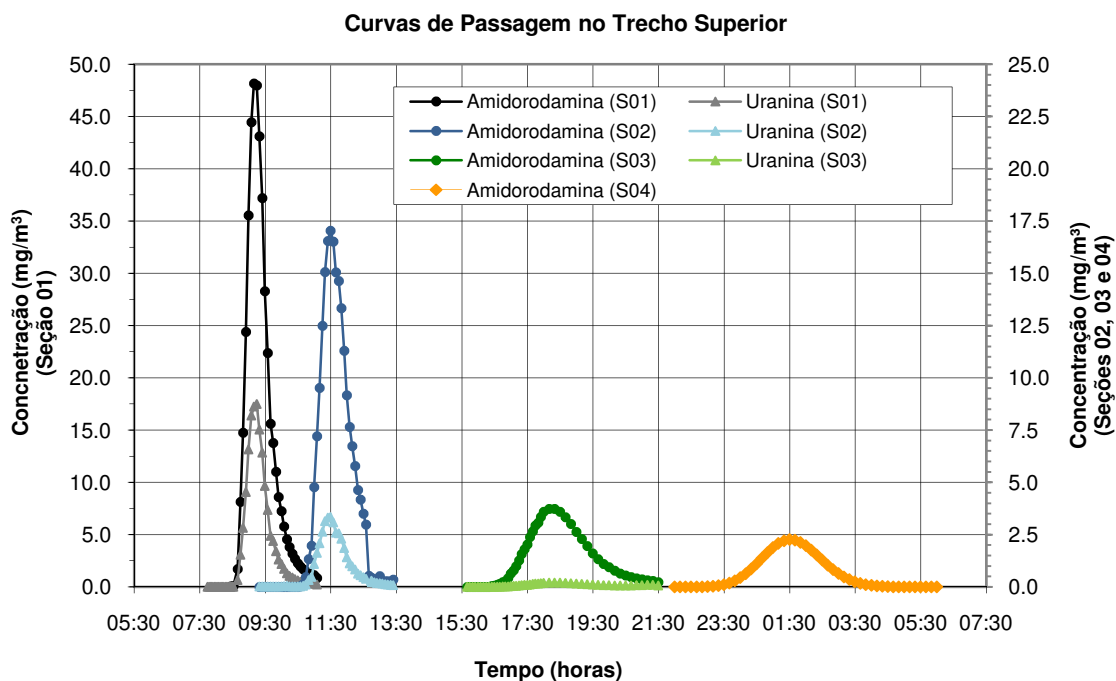


**Figura 94:** Reta de calibração para as seções de monitoramento S01 e S02.



**Figura 95:** Reta de calibração para as seções de monitoramento S03 e S04.

Sendo assim, após determinação da reta de calibração, utilizou-se a equação linear encontrada para se transformar a fluorescência das amostras em concentração, obtendo assim a evolução das curvas de passagem da nuvem de traçadores fluorescentes pelas seções de monitoramento do trecho superior do rio Piabanha, que estão apresentadas na **Figura 96**.



**Figura 96:** Curvas de passagem obtidas no ensaio com traçadores fluorescentes para as Seções 01, 02, 03 e 04.

Vale ressaltar que apenas as curvas de passagem dos traçadores fluorescentes Amidorodamina G e Uranina da Seção 01 estão associadas ao eixo principal (lado esquerdo) das ordenadas.

Após determinar a curva de concentração versus tempo da nuvem de traçador pelas seções de monitoramento, aplicou-se a metodologia explicada no subitem 3.1.8 para determinar os parâmetros hidráulicos e de transporte do rio Piabanha.

Os resultados encontrados para a DBM estão apresentados na **Tabela 9**.

**Tabela 9:** Valores da DBM determinados por fórmulas empíricas para um lançamento de poluentes, a partir da Seção 00 (Injeção 02).

DBM				
Trecho	WARD	YOTSUKURA	FISHER	RIMAR
Superior	810 m	75 m	340 m	880 m

Pode-se observar que os valores de DBM obtidos pelas fórmulas empíricas variam de 75 metros a 880 metros, sendo estes valores inferiores à distância entre o



ponto de injeção (S00) e a primeira seção de monitoramento (S01), indicando assim que a DBM aconteceria antes da primeira seção de monitoramento. Após analisar as curvas de passagem da Seção 01, comparou-se as áreas das curvas de concentração versus tempo e, assim, pôde-se comprovar que a Seção 01 está a uma distância ótima ou superior do ponto de injeção, isto é, distância na qual há mistura completa do traçador com o corpo hídrico.

Além de verificar se ocorreu a DBM, este método também foi utilizado para verificar a adequação do uso dos traçadores fluorescentes Amidorodamina G e Uranina neste estudo. Os resultados obtidos para a relação entre as áreas das curvas de passagem dos traçadores nas Seções 01, 02 e 03 estão apresentadas nas **Tabela 10**. Vale ressaltar que devido à ocorrência da chuva próximo a hora de coleta de amostras na Seção 04, a curva de passagem do traçador fluorescente Amidorodamina G ficou incompleta, perdendo assim a parte inicial da curva. Utilizando os parâmetros obtidos no ensaio de campo, a curva foi posteriormente estimada pelo método de Taylor. A curva de passagem da Uranina foi totalmente perdida, devido a sua concentração ter alcançado níveis próximos a margem de erro do aparelho de leitura.

**Tabela 10: Relação entre as áreas das curvas de passagem dos traçadores fluorescentes Uranina e Amidorodamina G para duas verticais nas Seções 01, 02 e 03.**

Relação entre as áreas				
Seções	Uranina	Amidorodamina	Vertical Esquerda	Vertical Direita
	Vertical Esquerda/ Vertical Direita	Vertical Esquerda/ Vertical Direita	Uranina / Amidorodamina	Uranina / Amidorodamina
Seção 01	1,01	1,02	0,35	0,35
Seção 02	0,95	1,00	0,18	0,19
Seção 03 <sup>1</sup>	-	-	0,07	
Seção 04 <sup>1</sup>	-	-	-	

<sup>1</sup> As Seções 03 e 04 coletaram-se amostras em apenas uma vertical.

Os resultados obtidos para a relação entre as áreas das curvas de passagem dos traçadores fluorescentes, nas duas verticais das Seções 01 e 02, demonstram que houve mistura completa dos traçadores fluorescentes com o rio Piabanha. Pôde-se perceber também que a relação entre a Uranina e a Amidorodamina G diminui pronunciadamente ao longo das seções de monitoramento. Isto se deu, possivelmente, por dois motivos: a)

devido ao rio neste trecho possuir uma pequena lamina d'água, acentuando assim o fotodecaimento da Uranina; b) devido ao Piabanha possuir muitas contribuições diretas de esgoto neste trecho do rio, fato que foi observado na visita de campo, que está descrita no subitem 4.2. Como o rio tem pouco volume de água neste trecho, a concentração de matéria orgânica é alta, e, por consequência, a Uranina sofre acentuadamente com perdas de massa.

Após verificação da DBM, o cálculo da vazão pôde ser realizado. Calculou-se também a velocidade média do trecho e o tempo de trânsito da nuvem de traçador. Para tanto, utilizou-se a metodologia proposta no subitem 3.1.8 para realização destes cálculos. Os resultados encontrados para o trecho superior do rio Piabanha encontram-se na **Tabela 11**.

Cabe ressaltar que a partir da curva de passagem estimada pelo método de Taylor para a Seção 04 não foi possível determinar o valor da vazão, tendo em vista que a hipótese principal não foi satisfeita, pois devido à forte precipitação, o regime não se mostrou permanente no decorrer do ensaio de campo. Para a Seção 04 houve apenas a possibilidade de uma estimativa da velocidade média e do tempo de trânsito.

**Tabela 11: Resultados de Vazão, Tempo de Trânsito e Velocidade Média obtidos para as seções a montante de Pedro do Rio.**

Campanha de Campo (22/03/2012)												
Seção	Vazão (m <sup>3</sup> /s)				Tempo de Trânsito (horas)				Velocidade Média (m/s)			
	Amidorod.		Uranina		Amidorod.		Uranina		Amidorod.		Uranina	
	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>
<b>Seção 01</b>	0,75	0,76	1,51	1,53	3,87	3,87	3,83	3,84	0,28	0,28	0,28	0,28
<b>Seção 02</b>	1,63	1,62	6,35	6,04	6,22	6,18	6,13	6,14	0,28	0,28	0,28	0,28
<b>Seção 03<sup>3</sup></b>	3,44		36,91		13,12		13,48		0,22		0,22	
<b>Seção 04<sup>3</sup></b>	-		-		17,43		-		0,42		-	

<sup>1</sup> Vertical Esquerda; <sup>2</sup> Vertical Direita; <sup>3</sup> Seções que só foram coletadas amostras em 1 vertical.

A partir da **Tabela 11**, pode-se perceber que há divergência nos valores obtidos para a vazão, quando calculada pela curva de passagem da Amidorodamina G e pela curva de passagem da Uranina. Isto é resultado da perda de massa da Uranina, pois como apresentado no subitem 3.1.8, a vazão é calculada por meio da razão entre a massa injetada de traçador fluorescente e a área da curva de passagem.

Tendo em vista que a seção que se encontra mais próxima a jusante da estação fluviométrica de Petrópolis é a Seção 02, comparou-se os valores de vazão calculados pelo método de traçadores com os valores médios do histograma de Petrópolis, para os meses de março e abril, e chegou-se a conclusão que o cálculo da vazão pela curva de passagem da Amidorodamina G foi adequado e que a curva de passagem da Uranina superestimou os valores de vazão para o trecho superior do rio Piabanha.

A vazão na Seção 04 foi estimada a partir da curva de passagem ajustada pelo método de Taylor, chegando a um valor de 5,49 m<sup>3</sup>/s. Este valor não foi apresentado na **Tabela 11**, pois como explicado anteriormente, esta estimativa não é adequada, devido à hipótese fundamental de regime permanente não ter sido cumprida.

Os tempos de trânsito apresentados na **Tabela 11** levam em consideração o deslocamento da nuvem de traçador fluorescente desde o ponto de injeção até a seção de monitoramento correspondente.

Os valores de velocidade média levam em consideração o trecho compreendido entre a seção anterior e a seção onde está sendo realizado o cálculo, e, por consequência, o tempo em que a nuvem de traçador leva para percorrer este trecho.

Cabe ressaltar que os valores de tempo de trânsito e de velocidade média determinados para a Seção 04 foram influenciados pela forte precipitação que se iniciou horas antes da coleta das amostras.

Como explicado no subitem 3.1.8, foram utilizados alguns métodos propostos por diferentes autores para estimar o coeficiente de dispersão ( $D_L$ ), mas primeiramente, determinou-se o  $D_L$  pelo método do ajuste da curva de passagem dos traçadores, por meio da equação de Taylor. As curvas de passagem dos traçadores fluorescentes e os ajustes encontrados para as Seções 01, 02, 03 e 04 estão apresentadas a seguir nas **Figuras 97, 98, 99 e 100**.

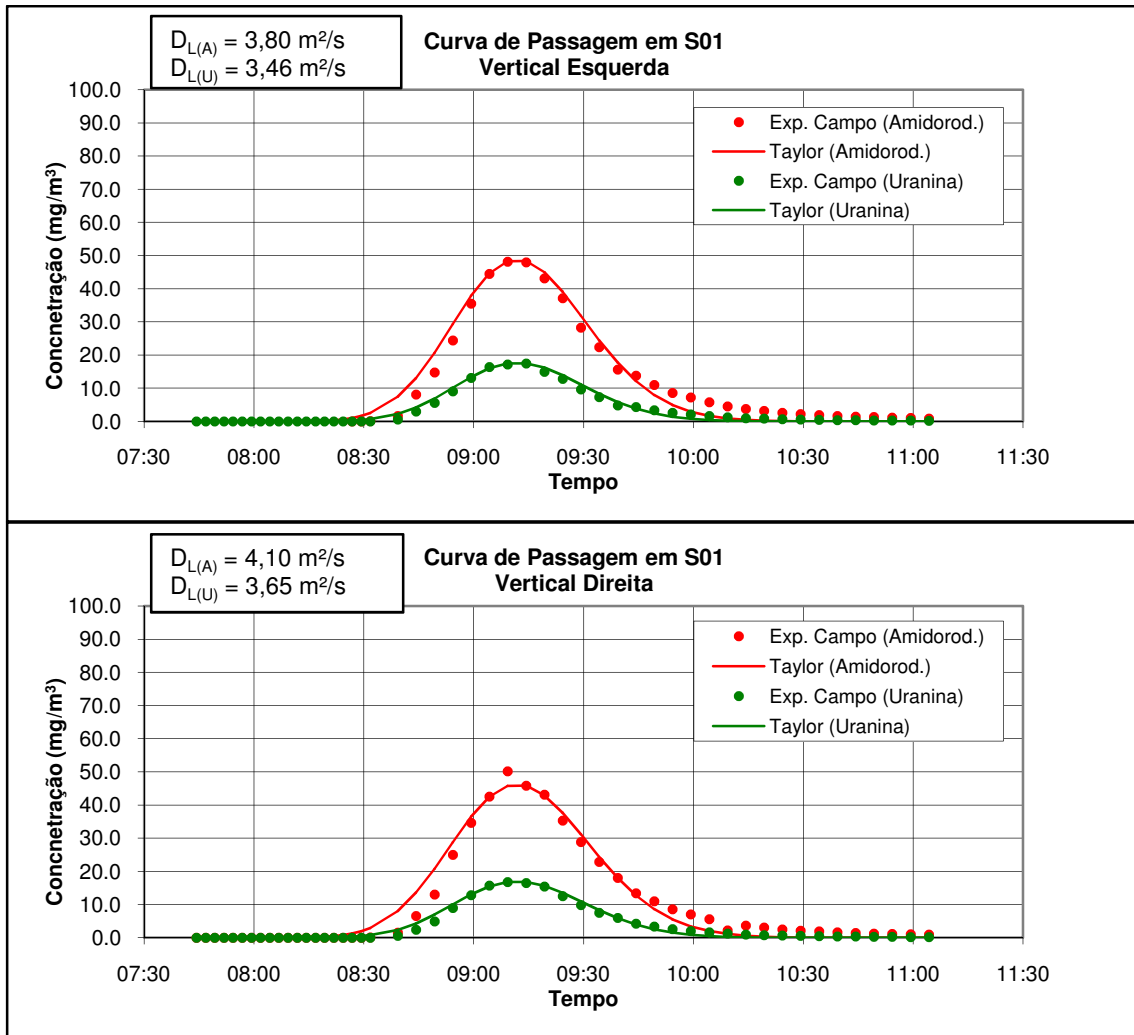


Figura 97: Curvas de passagem da nuvem de traçador fluorescente na Seção 01. Velocidade média  $U = 0,28 \text{ m/s}$ .  $D_{L(A)}$  e  $D_{L(U)}$  são referentes aos coeficientes de dispersão da Amidorodamina G e da Uranina, respectivamente.

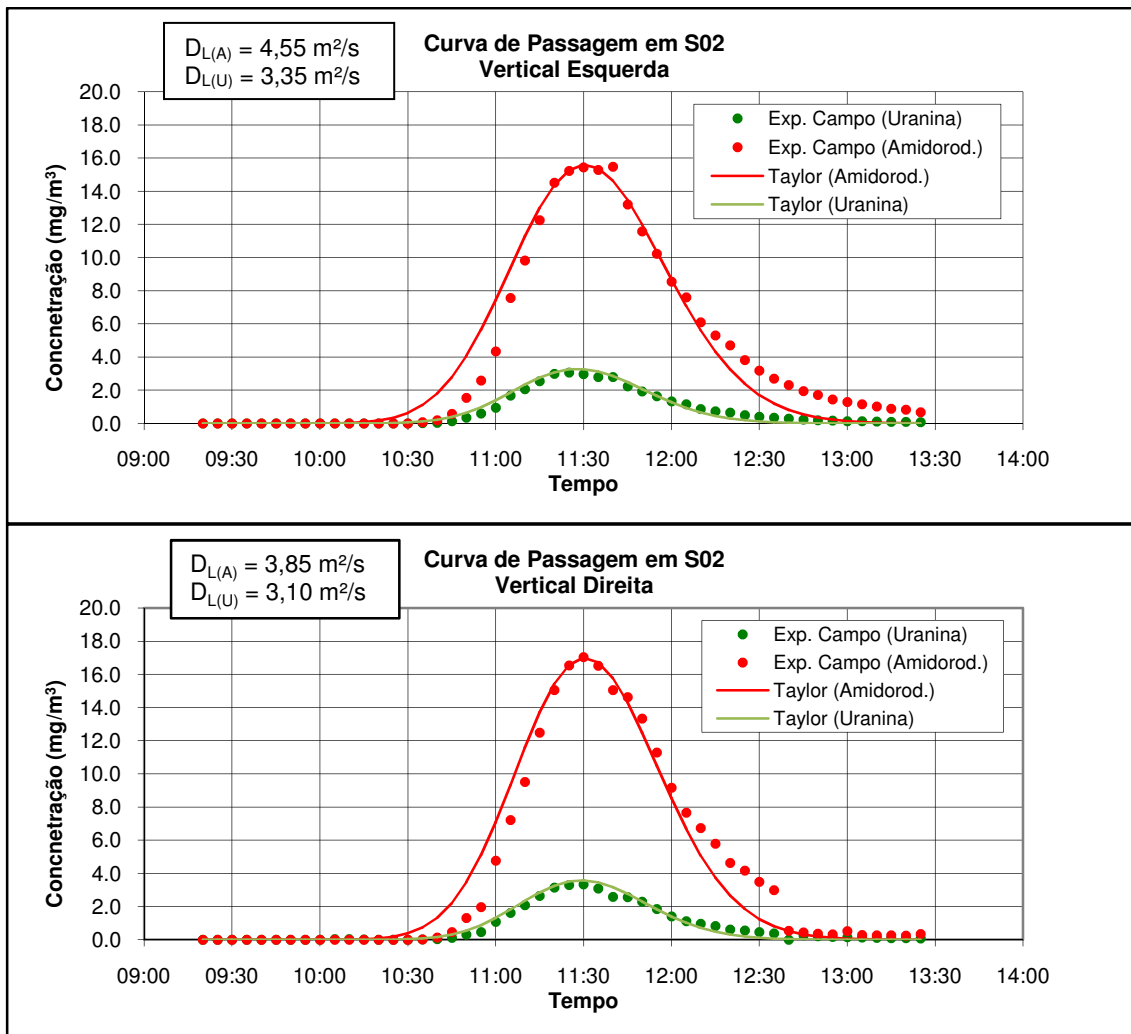


Figura 98: Curvas de passagem da nuvem de traçador fluorescente na Seção 02. Velocidade média  $U = 0,28 \text{ m/s}$ .  $D_{L(A)}$  e  $D_{L(U)}$  são referentes aos coeficientes de dispersão da Amidorodamina G e da Uranina, respectivamente.

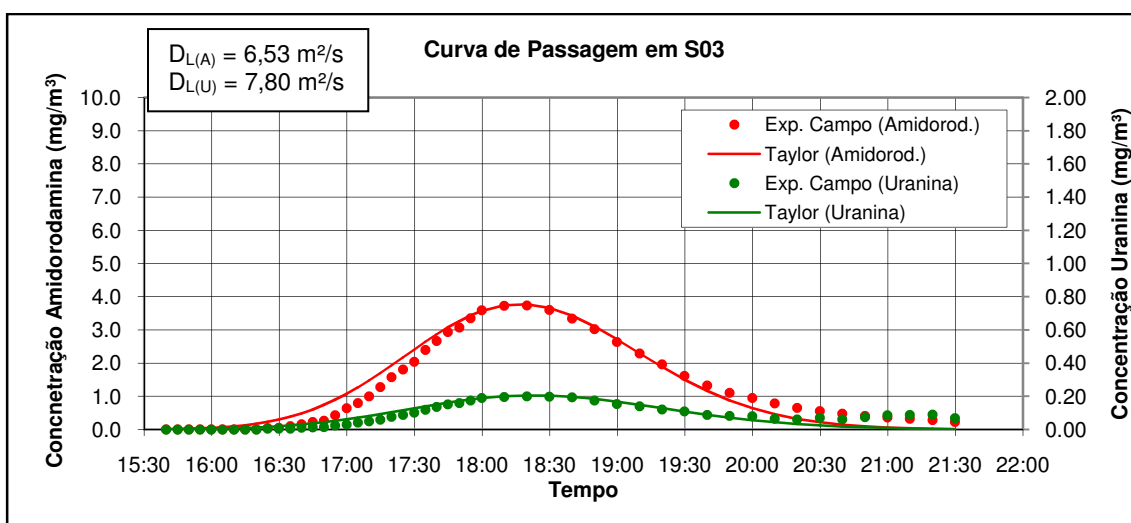
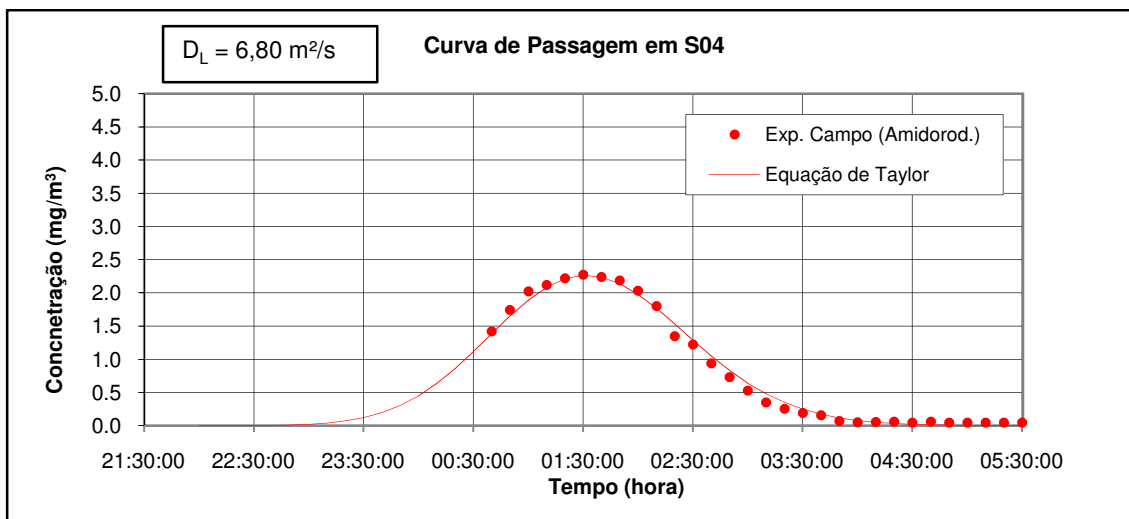


Figura 99: Curvas de passagem da nuvem de traçador fluorescente na Seção 03. Velocidade média  $U = 0,25 \text{ m/s}$ .  $D_{L(A)}$  e  $D_{L(U)}$  são referentes aos coeficientes de dispersão da Amidorodamina G e da Uranina, respectivamente.



**Figura 100:** Curva de passagem da nuvem de traçador fluorescente na Seção 04. Velocidade média  $U = 0,29$  m/s.

Pode-se observar que o aumento da vazão e da velocidade do escoamento no rio Piabanha prejudicou o pré-dimensionamento da coleta de amostras na Seção 04, perdendo-se assim o início da curva de passagem, que foi estimada posteriormente pela equação de Taylor. A curva de passagem estimada pelo modelo analítico de Taylor para a Seção 04 pode ser inadequada, devido a violar a hipótese de regime permanente.

A **Tabela 12** apresenta os valores do coeficiente de dispersão determinados pelo método do ajuste da curva de passagem para as Seções 01, 02, 03 e 04.

**Tabela 12:** Resultados obtidos por meio do método de ajuste das curvas de passagem para as Seções 01, 02, 03 e 04.

$D_L$ (m <sup>2</sup> /s) (Método do ajuste de Taylor)					
Traçadores	Verticais	Seção 01	Seção 02	Seção 03 <sup>1</sup>	Seção 04 <sup>1</sup>
Amidorodamina	Esquerda	3,80	4,55	6,53	-
	Direita	4,10	3,85		
Uranina	Esquerda	3,46	3,35	7,80	-
	Direita	3,65	3,10		

<sup>1</sup> As Seções 03 e 04 só foram coletadas amostras em uma vertical.

O valor de  $D_L$  encontrado para a Seção 04 foi de 6,80 m<sup>2</sup>/s, mas como explicado anteriormente, a curva de passagem foi prejudicada pela forte precipitação e, com isso, não foi apresentado um valor de  $D_L$  para esta seção.

Os resultados de  $D_L$ , das seções do trecho superior do rio Piabanha, estimados pelas fórmulas experimentais apresentadas no subitem 3.1.8, estão apresentados na **Tabela 13**.

Vale ressaltar que os métodos de Fisher e Krenkel levam em consideração a seção de monitoramento anterior para o cálculo do  $D_L$ , sendo assim não foi possível se estimar o coeficiente de dispersão para a Seção 01, tendo em vista que esta, por sua vez, é a primeira seção de monitoramento a jusante do ponto de injeção.

**Tabela 13: Valores estimados por fórmulas experimentais para o coeficiente de dispersão.**

$D_L$ ( $m^2/s$ )						
Métodos	Traçadores	Verticais	Secção 01	Secção 02	Secção 03 <sup>1</sup>	Secção 04 <sup>1</sup>
<b>TAYLOR (1954)</b>	Amidorodamina	Esquerda	3,83	4,55	6,53	6,80
		Direita	4,10	3,85		
	Uranina	Esquerda	3,48	3,35	7,80	-
		Direita	3,66	3,10		
<b>LEVENSPIEL e SMITH (1957)</b>	Amidorodamina	Esquerda	6,32	5,64	7,77	6,88
		Direita	6,15	4,14		
	Uranina	Esquerda	5,70	5,44	11,03	-
		Direita	5,68	5,27		
<b>PARKER (1963)</b>	Amidorodamina	Esquerda	6,73	5,91	8,06	8,06
		Direita	6,55	4,30		
	Uranina	Esquerda	6,01	5,66	11,72	-
		Direita	6,00	5,47		
<b>FISHER (1967)</b>	Amidorodamina	Esquerda	-	5,31	10,52	4,00
		Direita	-	1,27		
	Uranina	Esquerda	-	5,61	16,31	-
		Direita	-	5,19		
<b>KRENKEL (1967)</b>	Amidorodamina	Esquerda	-	0,31	0,38	1,36
		Direita	-	0,36		
	Uranina	Esquerda	-	0,07	0,02	-
		Direita	-	0,09		
<b>RIBEIRO <i>et al.</i> (2010)</b>	Amidorodamina	Esquerda	0,21	0,27	0,54	2,19
		Direita	0,22	0,26		
	Uranina	Esquerda	0,20	0,26	0,55	-
		Direita	0,21	0,25		

<sup>1</sup> As Seções 03 e 04 só foram coletadas amostras em uma vertical.

A partir dos resultados estimados pelas equações experimentais para o coeficiente de dispersão, realizou-se um cálculo para verificar a relação entre os valores de  $D_L$  estimados por estas fórmulas e os determinados pela curva de ajuste. Este método consiste em calcular a variação relativa entre os valores estimados pelas fórmulas

experimentais e os determinados pela curva de ajuste de Taylor. A **Tabela 14** apresenta os resultados obtidos para esta variação relativa.

**Tabela 14: Variação Relativa, em %, entre os coeficientes de dispersão estimados pelas fórmulas experimentais e os determinados pela curva de ajuste de Taylor.**

Variação Relativa em % (Métodos experimentais em relação ao ajuste da curva de Taylor)						
Métodos	Traçadores	Verticais	Secção 01	Secção 02	Seção 03 <sup>1</sup>	Seção 04 <sup>1</sup>
<b>TAYLOR (1954)</b>	Amidorodamina	Esquerda	-0,8	0	0	-
		Direita	0	0		
	Uranina	Esquerda	-0,6	0	0	-
		Direita	-0,3	0		
<b>LEVENSPIEL e SMITH (1957)</b>	Amidorodamina	Esquerda	-66,3	-24,0	-19,0	-
		Direita	-50,0	-7,5		
	Uranina	Esquerda	-64,7	-62,4	-41,4	-
		Direita	-55,6	-70,0		
<b>PARKER (1963)</b>	Amidorodamina	Esquerda	-77,1	-29,9	-23,4	-
		Direita	-59,7	-11,7		
	Uranina	Esquerda	-73,70	-69,0	-50,2	-
		Direita	-64,4	-76,4		
<b>FISHER (1967)</b>	Amidorodamina	Esquerda	-	-16,7	-61,1	-
		Direita	-	67,0		
	Uranina	Esquerda	-	-67,4	-109,1	-
		Direita	-	-67,4		
<b>KRENKEL (1967)</b>	Amidorodamina	Esquerda	-	93,2	94,2	-
		Direita	-	90,6		
	Uranina	Esquerda	-	97,9	99,7	-
		Direita	-	97,1		
<b>RIBEIRO <i>et al.</i> (2010)</b>	Amidorodamina	Esquerda	94,5	94,1	91,7	-
		Direita	94,6	93,2		
	Uranina	Esquerda	94,2	92,2	92,9	-
		Direita	94,2	91,9		

<sup>1</sup> As Seções 03 e 04 só foram coletadas amostras em uma vertical.

Como esperado, a equação experimental de Taylor foi a que obteve o melhor resultado de  $D_L$  para todas as seções de monitoramento no trecho superior do rio Piabanha.

As equações experimentais de Levenspiel - Smith e Parker, assim como no trecho inferior do rio Piabanha, apresentaram resultados superestimados para todas as seções de monitoramento, porém desta vez mais suavemente, superando de 8 a 70% e de 12 a 77%, respectivamente, os valores obtidos pelo método de ajuste de Taylor.



Os resultados de  $D_L$  obtidos pela equação de Fisher variaram significativamente, apresentando apenas um coeficiente de dispersão subestimado em 67%, na Seção 02 e todos os outros  $D_L$  superestimados, variando de 16 a 109%.

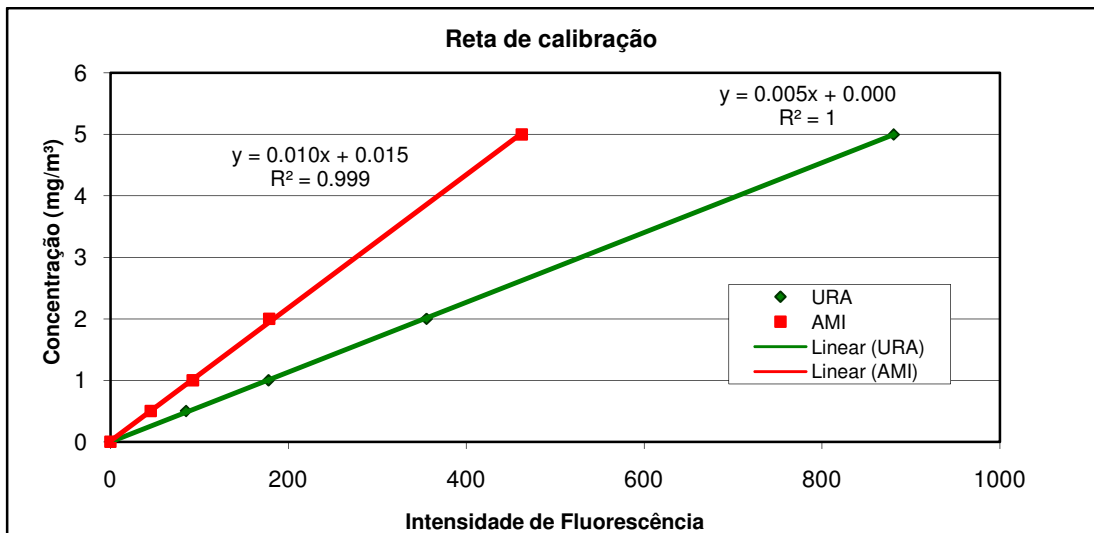
A equação experimental de Krenkel subestimou os valores de  $D_L$  para as seções de monitoramento do trecho superior do rio Piabanha, tendo sua variação relativa oscilando de 91 a 100%.

Pode-se observar que a equação desenvolvida por Ribeiro *et al.*, assim como a de Krenkel, subestimou os valores de  $D_L$  para as seções de monitoramento do trecho superior do rio Piabanha. Isto pode ter acontecido devido a esta equação ser validada para ser usada em rios com vazões compreendidas entre 19,57 e 48,54 m<sup>3</sup>/s, que são superiores às observadas para este trecho do rio Piabanha.

- PRIMEIRA CAMPANHA

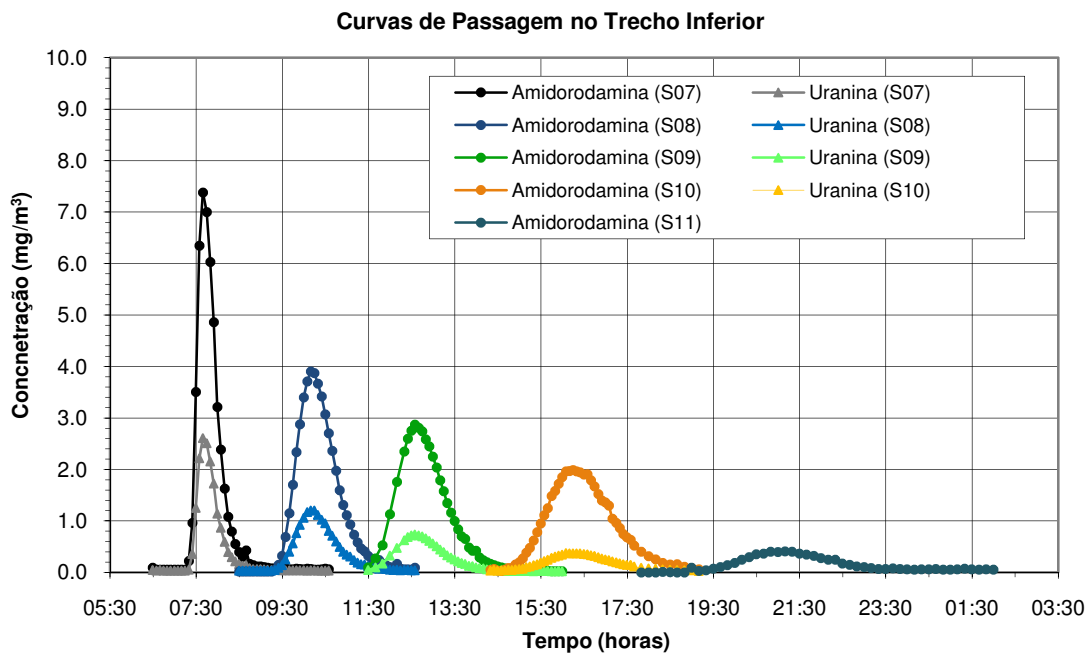
A primeira campanha foi no trecho inferior do rio Piabanha, cuja injeção instantânea de traçadores fluorescentes foi feita na Seção 06, sob a ponte principal de Pedro do Rio, no dia 20/03/2012. Foi realizado o monitoramento da passagem da nuvem de traçador até a Seção 11. Não se obteve dados na Seção 12, pois não foram coletadas amostras nesta seção, devido à verificação de baixas concentrações dos traçadores na Seção 11, e, levando em conta que a distância entre as Seções 11 e 12 é de aproximadamente 11 km e que nessa extensão há o reservatório da PCH Piabanha, a nuvem de traçador passaria pela Seção 12 com baixíssimas concentrações, impossibilitando assim a leitura da fluorescência pelo espectrofluorímetro.

Após realizar a leitura da fluorescência das amostras, determinou-se a reta de calibração do aparelho, que foi utilizada nas 5 seções de monitoramento a jusante de Pedro do Rio e está apresentada na **Figura 101**.



**Figura 101:** Reta de calibração para as seções de monitoramento S07, S08, S09, S10 e S11.

Após determinar a reta de calibração, utilizou-se a equação linear encontrada para transformar a fluorescência das amostras em concentração, obtendo assim as curvas de passagem da nuvem de traçadores fluorescentes pelas seções de monitoramento a jusante de Pedro do Rio, apresentadas na **Figura 102**.



**Figura 102:** Curvas de passagem obtidas no ensaio com traçadores fluorescentes para as Seções 07, 08, 09, 10 e 11.

Determinada a curva de passagem da nuvem de traçador pelas seções de monitoramento, aplicou-se a metodologia explicada no subitem 3.1.8 para determinação dos parâmetros hidráulicos e de transporte do rio Piabanha.

Os resultados fornecidos pelas fórmulas empíricas para o cálculo da DBM estão apresentados na **Tabela 15**.

**Tabela 15: Valores da distância de boa mistura (DBM) determinados por fórmulas empíricas para um lançamento de poluentes, a partir da Seção 06.**

DBM				
Trecho	WARD	YOTSUKURA	FISHER	RIMAR
Inferior	1600 m	275 m	980 m	1740 m

Pode-se observar que os valores de DBM obtidos pelas fórmulas empíricas variam de 275 metros a 1740 metros, sendo estes valores inferiores à distância entre o ponto de injeção (S06) e a primeira seção de monitoramento (S07), indicando assim que a DBM aconteceria antes da primeira seção de monitoramento, fato que foi comprovado após a análise das curvas de concentração versus tempo da Seção 07.

A análise das curvas de concentração versus tempo foi feita de modo a verificar se as áreas das curvas de passagem dos traçadores fluorescentes são as mesmas, em cada uma das verticais da Seção 07. Além de utilizar este método para verificação da DBM, pode-se verificar a adequação do uso dos traçadores fluorescentes Amidorodamina G e Uranina no local de estudo, pois como explicado no subitem 2.2.1, traçadores distintos possuem certas particularidades. Os resultados obtidos para a relação entre as áreas das curvas de passagem dos traçadores nas Seções 07, 08, 09, 10 e 11 estão apresentadas nas **Tabela 16**.

**Tabela 16: Relação entre as áreas das curvas de passagem dos traçadores fluorescentes Uranina e Amidorodamina G para duas verticais nas Seções 07, 08, 09, 10 e 11.**

Relação entre as áreas				
Seções	Uranina	Amidorodamina	Vertical Esquerda	Vertical Direita
	Vertical Esquerda/ Vertical Direita	Vertical Esquerda/ Vertical Direita	Uranina / Amidorodamina	Uranina / Amidorodamina
Seção 07	0,96	0,95	0,36	0,36
Seção 08	1,00	0,98	0,33	0,32
Seção 09 <sup>1</sup>	-	-	0,26	
Seção 10 <sup>1</sup>	-	-	0,20	
Seção 11 <sup>1</sup>	-	-	-	

<sup>1</sup> As Seções 09, 10 e 11 só foram coletadas amostras em uma vertical.

Os resultados obtidos para a razão entre as verticais, esquerda e direita, para as áreas das curvas de passagem dos traçadores fluorescentes Uranina e Amidorodamina G nas Seções 07 e 08, demonstraram que a DBM foi satisfeita e assim, pode-se determinar os valores de vazão, tempo de trânsito e velocidade média.

Pode-se observar também que a relação entre a Uranina e Amidorodamina G diminui, quando observada a evolução da curva de passagem pelas seções de monitoramento; como explicado no subitem 2.2.1, a Uranina sofre perdas consideráveis de massa quando utilizada para monitorar corpos hídricos com presença de matéria orgânica.

Cabe ressaltar que não foi possível encontrar a razão entre as áreas das curvas de passagem da Uranina e da Amidorodamina G para a Seção 11, pois a concentração da Uranina encontrou-se dentro do ruído do espectrofluorímetro.

A partir dos resultados obtidos por meio da integração das curvas de passagem dos traçadores fluorescentes, isto é, as áreas das curvas de concentração versus tempo, pôde-se calcular a vazão do escoamento em cada uma das seções de monitoramento, utilizando a metodologia proposta no subitem 3.1.8, que relaciona a massa injetada de traçadores com a integral da concentração em relação ao tempo. As vazões obtidas para o escoamento em cada uma das seções de monitoramento a jusante de Pedro do Rio estão apresentadas na **Tabela 17**.

O cálculo de tempo de trânsito e a velocidade média foram realizados seguindo a metodologia proposta no subitem 3.1.8. Os resultados estão apresentados na **Tabela 17**.

Tabela 17: Valores de Vazão, Tempo de Trânsito e Velocidade Média obtidos para as seções a jusante de Pedro do Rio.

Campanha de campo (20/03/2012)												
Seção	Vazão (m <sup>3</sup> /s)				Tempo de Trânsito (horas)				Velocidade média (m/s)			
	Amidorod.		Uranina		Amidorod.		Uranina		Amidorod.		Uranina	
	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>	V.E. <sup>1</sup>	V.D. <sup>2</sup>
Seção 07	13,45	12,72	22,19	21,19	2,37	2,39	2,39	2,41	0,53	0,52	0,52	0,52
Seção 08	13,34	13,14	24,41	24,47	4,92	4,89	4,91	4,88	0,37	0,37	0,37	0,36
Seção 09	14,34		32,48		7,33		7,36		0,47		0,47	
Seção 10	14,79		43,61		11,01		11,02		0,36		0,36	
Seção 11	39,67		-		15,83		-		0,48		-	

<sup>1</sup> Vertical Esquerda; <sup>2</sup> Vertical Direita.

Tendo em vista que entre as Seções 06 e 07 não há contribuições laterais significantes, utilizou-se a vazão encontrada em S07 para representar a vazão em S06.

A partir da **Tabela 17**, pode-se perceber que há divergência nos valores obtidos para a vazão, quando calculada pela curva de passagem da Amidorodamina G e pela curva de passagem da Uranina. Isto é resultado da perda de massa do traçador fluorescente Uranina, pois como apresentado no subitem 3.1.8, a vazão é calculada por meio da razão entre a massa injetada de traçador fluorescente e a área da curva de passagem.

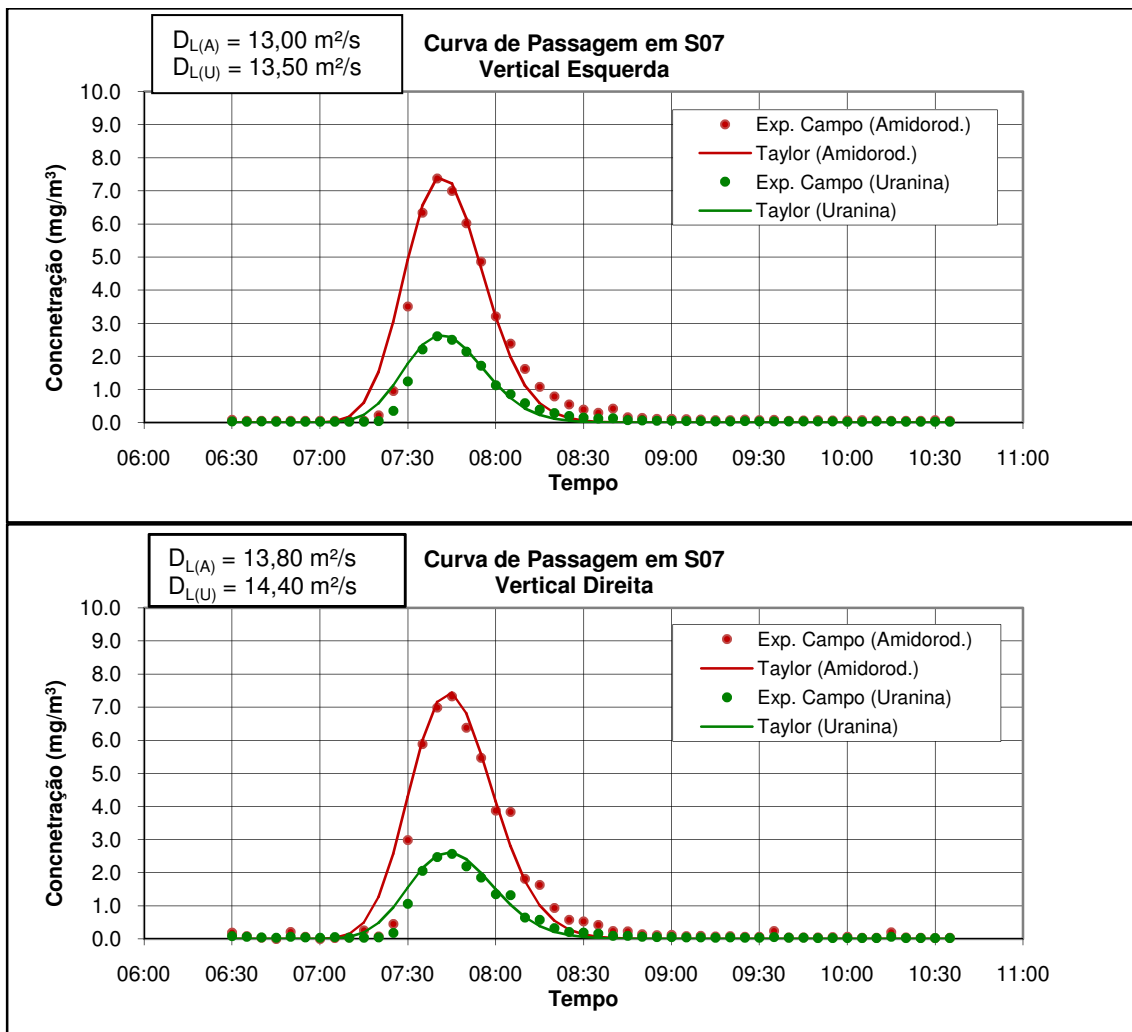
Observando-se o histograma de vazões de Pedro do Rio, apresentado no subitem 4.1.4, pôde-se perceber que as vazões médias para os meses de março e abril são de 15 e 12 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Tendo em vista que o ensaio de campo foi realizado na segunda quinzena de março, concluiu-se que a vazão determinada a partir da curva de passagem do traçador fluorescente Amidorodamina G foi consistente e que, assim como no trecho superior do rio Piabanha, o cálculo da vazão pela curva de passagem da Uranina não foi adequada.

Os tempos de trânsito apresentados na **Tabela 17** levam em consideração o deslocamento da nuvem de traçador fluorescente desde o ponto de injeção até a seção de monitoramento correspondente.

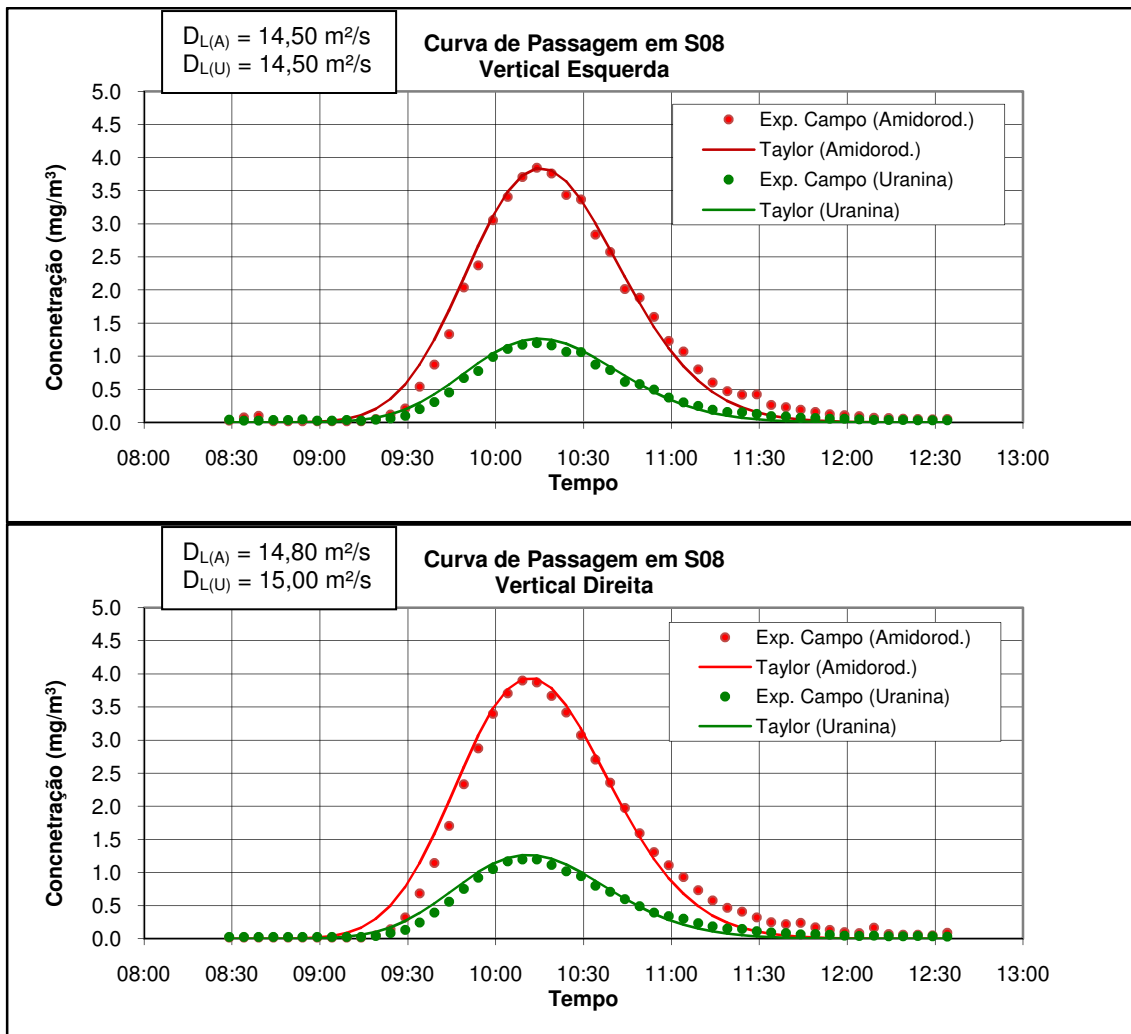
Os valores de velocidade média levam em consideração o trecho compreendido entre a seção anterior e a seção onde está sendo realizado o cálculo, e, por consequência, o tempo em que a nuvem de traçador leva para percorrer este trecho.

Cabe ressaltar que a perda de traçador fluorescente Uranina no experimento de campo não tornou inapropriado determinar o tempo de trânsito e a velocidade média da nuvem de traçador, tendo em vista que a perda de traçador não influencia no tempo em que a nuvem de traçador leva para passar pela seção de monitoramento.

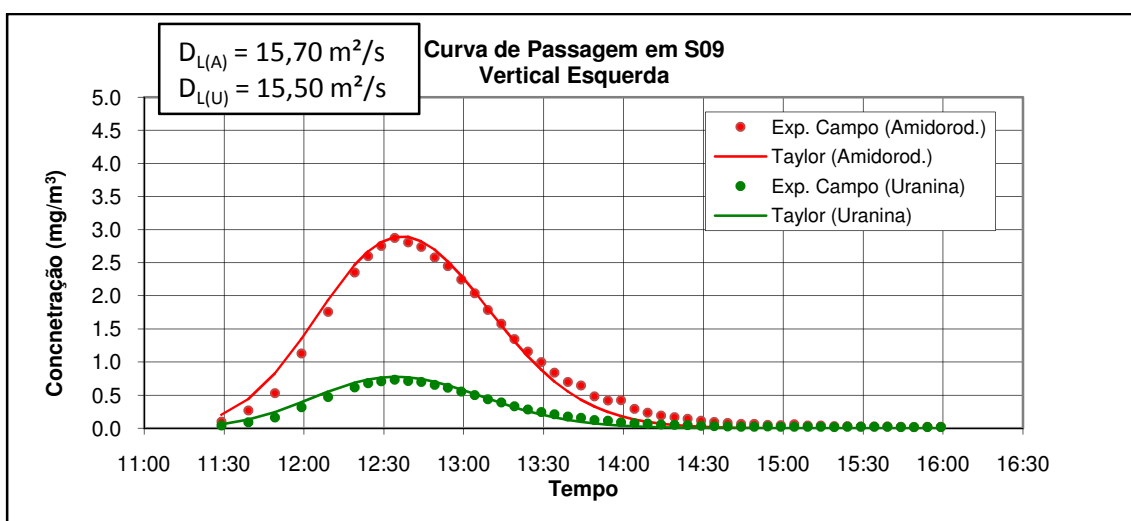
Como visto no subitem 3.1.8, alguns métodos de cálculos foram utilizados para estimar o coeficiente de dispersão ( $D_L$ ). Primeiramente, determinou-se o  $D_L$  pelo método do ajuste da curva de passagem dos traçadores, por meio da equação de Taylor. As curvas de passagem dos traçadores fluorescentes e os ajustes encontrados para as Seções 07, 08, 09, 10 e 11 estão apresentados nas **Figuras 103, 104, 105, 106 e 107**, respectivamente.



**Figura 103:** Curvas de passagem da nuvem de traçador fluorescente na Seção 07. Velocidade média  $U = 0,52 \text{ m/s}$ .  $D_{L(A)}$  e  $D_{L(U)}$  são referentes aos coeficientes de dispersão da Amidorodamina G e da Uranina, respectivamente.



**Figura 104:** Curvas de passagem da nuvem de traçador fluorescente na Seção 08. Velocidade média  $U = 0,46 \text{ m/s}$ .  $D_{L(A)}$  e  $D_{L(U)}$  são referentes aos coeficientes de dispersão da Amidorodamina G e da Uranina, respectivamente.



**Figura 105:** Curvas de passagem da nuvem de traçador fluorescente na Seção 09. Velocidade média  $U = 0,49 \text{ m/s}$ .  $D_{L(A)}$  e  $D_{L(U)}$  são referentes aos coeficientes de dispersão da Amidorodamina G e da Uranina, respectivamente.

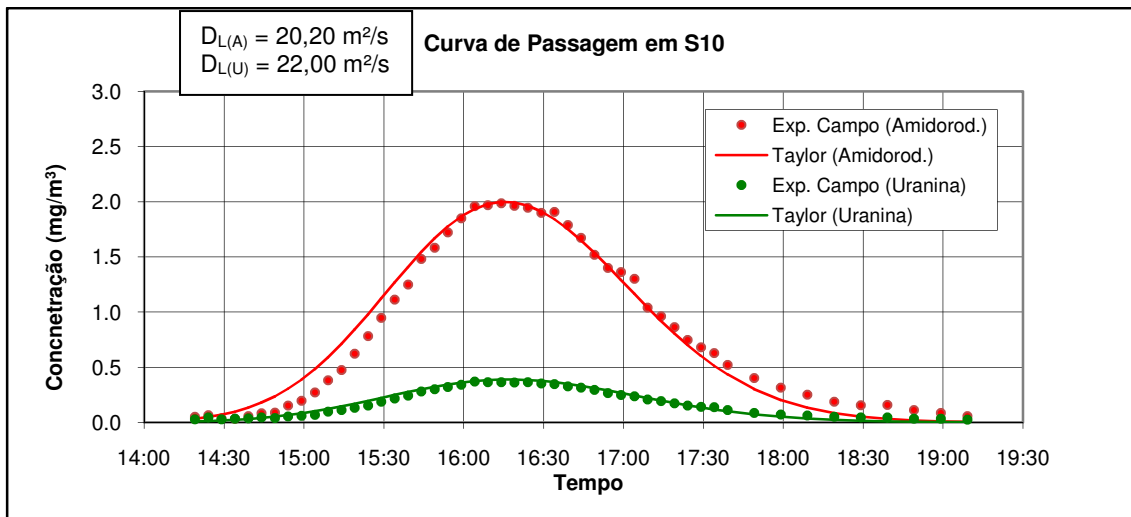


Figura 106: Curvas de passagem da nuvem de traçador fluorescente na Seção 10. Velocidade média  $U = 0,46$  m/s.  $D_{L(A)}$  e  $D_{L(U)}$  são referentes aos coeficientes de dispersão da Amidorodamina G e da Uranina, respectivamente.

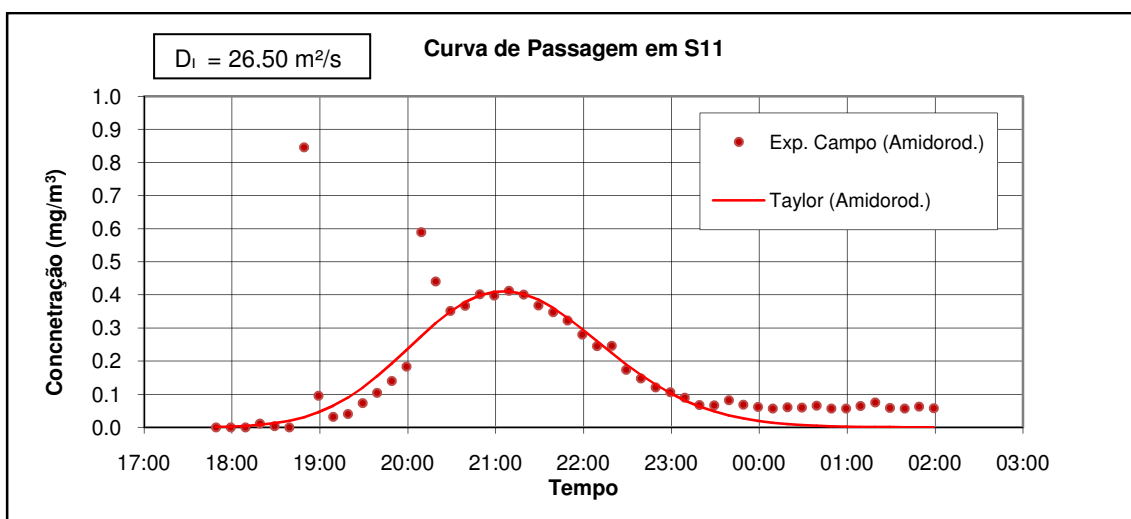


Figura 107: Curva de passagem da nuvem de traçador fluorescente na Seção 11. Velocidade média  $U = 0,44$  m/s.

A seguir, a **Tabela 18** apresenta os valores do coeficiente de dispersão determinados pelo método do ajuste da curva de passagem de Taylor para as Seções 07, 08, 09, 10 e 11.



**Tabela 18: Resultados obtidos por meio do método de ajuste das curvas de passagem para as Seções 07, 08, 09, 10 e 11.**

<b><math>D_L</math> (m<sup>2</sup>/s)</b> <b>(Método do ajuste de Taylor)</b>						
<b>Traçadores</b>	<b>Verticais</b>	<b>Seção 07</b>	<b>Seção 08</b>	<b>Seção 09<sup>1</sup></b>	<b>Seção 10<sup>1</sup></b>	<b>Seção 11<sup>1</sup></b>
Amidorodamina	Esquerda	13,00	14,50	15,70	20,20	26,50
	Direita	13,80	14,80			
Uranina	Esquerda	13,50	14,50	15,50	22,00	-
	Direita	14,40	15,00			

<sup>1</sup> As Seções 09, 10 e 11 só foram coletadas amostras em uma vertical.

Não foi possível calcular o coeficiente de dispersão para o traçador fluorescente Uranina na Seção 11, devido a sua concentração ter alcançado valores próximos a margem de erro do aparelho de leitura.

Os valores de  $D_L$  estimados pelas fórmulas experimentais apresentadas no subitem 3.1.8, para as seções do trecho inferior do rio Piabanha, estão apresentadas na **Tabela 19**.

Vale ressaltar que assim como na Seção 01 do trecho inferior do rio Piabanha, os métodos de Fisher e de Krenkel não puderam ser utilizados para estimar o valor de  $D_L$  na Seção 07.

**Tabela 19: Valores estimados por fórmulas experimentais para o coeficiente de dispersão.**

$D_L$ ( $m^2/s$ )							
Métodos	Traçadores	Verticais	Secção 07	Secção 08	Secção 09	Secção10	Secção11
<b>TAYLOR</b> (1954)	Amidorodamina	Esquerda	13,00	14,49	15,70	20,20	26,48
		Direita	13,80	14,83			
	Uranina	Esquerda	13,51	14,54	15,50	22,01	-
		Direita	14,39	14,97			
<b>LEVENSPIEL</b> <b>e SMITH</b> (1957)	Amidorodamina	Esquerda	41,14	18,94	20,23	22,63	60,16
		Direita	39,44	19,68			
	Uranina	Esquerda	50,81	23,90	26,46	28,95	-
		Direita	50,25	24,78			
<b>PARKER</b> (1963)	Amidorodamina	Esquerda	47,26	19,94	21,09	23,38	62,34
		Direita	44,95	20,87			
	Uranina	Esquerda	59,77	25,28	27,95	29,95	-
		Direita	58,50	26,43			
<b>FISHER</b> (1967)	Amidorodamina	Esquerda	-	10,63	19,86	26,87	152,22
		Direita	-	11,80			
	Uranina	Esquerda	-	13,11	27,81	33,64	-
		Direita	-	13,55			
<b>KRENKEL</b> (1967)	Amidorodamina	Esquerda	-	2,86	9,92	5,17	0,62
		Direita	-	3,09			
	Uranina	Esquerda	-	2,30	4,51	2,15	-
		Direita	-	2,43			
<b>RIBEIRO</b> <i>et al.</i> (2010)	Amidorodamina	Esquerda	10,67	8,86	7,90	4,23	25,53
		Direita	10,46	8,90			
	Uranina	Esquerda	10,49	8,95	7,89	4,23	24,60
		Direita	10,37	8,99			

Pode-se observar uma grande variação entre os valores de  $D_L$  estimados por estas fórmulas experimentais. A seguir são apresentados os valores obtidos a partir do cálculo da Variação Relativa entre os valores do coeficiente de dispersão obtidos pelas fórmulas experimentais e pelo ajuste da curva de passagem de Taylor, **Tabela 20**.

Tabela 20: Variação Relativa, em %, entre os valores do coeficiente de dispersão obtidos pelas equações experimentais e pelo ajuste da curva de passagem de Taylor.

Variação Relativa em % (Métodos experimentais em relação ao ajuste da curva de Taylor)							
Métodos	Traçadores	Verticais	Secão 07	Secão 08	Secão 09	Secão10	Secão11
<b>TAYLOR</b> (1954)	Amidorodamina	Esquerda	0	0,1	0	0	0,1
		Direita	0	-0,2			
	Uranina	Esquerda	-0,1	-0,3	0	0	-
		Direita	0,07	0,2			
<b>LEVENSPIEL</b> <b>e SMITH</b> (1957)	Amidorodamina	Esquerda	-216,	-30,6	-28,8	-12,0	-127,0
		Direita	-185,8	-33,0			
	Uranina	Esquerda	-276,3	-64,8	-70,7	-31,6	-
		Direita	-249,0	-65,2			
<b>PARKER</b> (1963)	Amidorodamina	Esquerda	-263,5	-37,5	-34,3	-15,7	-135,2
		Direita	-225,7	-41,0			
	Uranina	Esquerda	-342,7	-74,3	-80,3	-36,1	-
		Direita	-306,2	-76,2			
<b>FISHER</b> (1967)	Amidorodamina	Esquerda	-	26,7	-26,5	-33,0	-474,4
		Direita	-	20,3			
	Uranina	Esquerda	-	9,6	-79,4	-52,9	-
		Direita	-	9,7			
<b>KRENKEL</b> (1967)	Amidorodamina	Esquerda	-	80,3	36,8	74,4	97,6
		Direita	-	78,1			
	Uranina	Esquerda	-	84,1	70,9	90,2	-
		Direita	-	83,8			
<b>RIBEIRO</b> <i>et al.</i> (2010)	Amidorodamina	Esquerda	17,9	38,9	49,7	79,0	3,7
		Direita	24,2	39,9			
	Uranina	Esquerda	22,3	38,3	49,1	80,8	-
		Direita	28,00	40,1			

Como o ajuste da curva de passagem de Taylor usa dados medidos em campo, considerou-se que este método é o que apresenta o melhor resultado na determinação do coeficiente de dispersão, sendo assim o valor de referência para o cálculo da variação relativa.

Como esperado, a equação experimental de Taylor foi a que obteve o melhor resultado de  $D_L$  para todas as seções de monitoramento a jusante de Pedro do Rio.

As equações experimentais de Levenspiel - Smith e Parker apresentaram resultados superestimados para todas as seções de monitoramento a jusante de Pedro do Rio, superando de 12 a 276% e de 15 a 342%, respectivamente, os valores obtidos pelo método de ajuste de Taylor.

Os resultados de  $D_L$  obtidos pela equação de Fisher variaram de maneira estrondosa, sendo inferiores de 10 a 27% para a Seção 08 e superiores de 27 a 474% para as Seções 09, 10 e 11.

Assim como no trecho superior do rio Piabanha, a equação experimental de Krenkel subestimou os valores de  $D_L$  para as seções de monitoramento do trecho inferior do rio Piabanha, tendo sua variação relativa oscilando de 37 a 98%.

A equação de Ribeiro *et al.* subestimou os valores de  $D_L$  para as seções de monitoramento S07, S08, S09 e S10, variando de 18% a 81% aproximadamente. O coeficiente de dispersão estimado por esta fórmula para a Seção 11 foi compatível ao determinado pelo método de ajuste de Taylor. Vale ressaltar que esta equação empírica é validada para situações de rios com vazões compreendidas entre 19,57 e 48,54 m<sup>3</sup>/s, situação esta que foi observada apenas na Seção 11 do rio Piabanha.

#### 5.1.2. MEDIÇÃO CONVENCIONAL

Neste estudo foi contratada uma empresa para realizar uma campanha de campo, cujo objetivo foi medir dados hidráulicos e topobatimétricos de seções de interesse na calha principal do rio Piabanha, para usar na modelagem hidrodinâmica com o *software* HEC-RAS 4.1.

Os perfis topobatimétricos determinados nesta campanha estão apresentados no subitem 4.5. Os dados de vazão obtidos estão apresentados na **Tabela 21**.

**Tabela 21: Valores de vazão e velocidade média obtidos na campanha de campo realizada nos dias 17 e 18/09/2012, para as Seções 07, 08, 09, 10, 19 e 11.**

Seções	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade Média (m/s)
Seção 07	3,42	0,30
Seção 08	3,42	0,06
Seção 09	3,47	0,17
Seção 10	3,63	0,66
Seção 19	3,74	0,16
Seção 11	9,51	0,27

Os valores de vazão obtidos na Seção 07 foram comparados às vazões apresentadas no histograma da estação de Pedro do Rio (**Figura 17**), pois conforme

observado na descrição de campo (subitem 4.2), não há contribuições significantes entre a estação fluviométrica de Pedro do Rio e a Seção 07.

Observou-se no histograma de Pedro do Rio, que os valores de vazão média obtida por meio da série histórica de vazão em Pedro do Rio para o mês de setembro e a vazão mínima de 7 dias para um tempo de recorrência de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) são de, aproximadamente, 5 m<sup>3</sup>/s e de 2,5 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Com isso, percebeu-se que o valor da vazão medida em campo está na faixa dos valores de vazão média e mínima ( $Q_{7,10}$ ) do histograma de Pedro do Rio para esta época do ano.

A vazão e a velocidade média obtidas com as medições convencionais não foram utilizadas, visto que se buscou simular as condições de escoamento do dia do ensaio de campo com traçadores fluorescentes, ocorrido em março de 2012. Adicionalmente, a velocidade média obtida para cada seção transversal não é representativa do trecho compreendido entre as mesmas, tornando assim inapropriado o uso das mesmas na modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha

## **5.2. MODELOS COMPUTACIONAIS**

Os modelos computacionais foram utilizados, neste trabalho, com o objetivo de se conhecer as características hidráulicas e de transporte do rio Piabanha. Primeiramente foi utilizado o modelo hidrodinâmico HEC-RAS 4.1, em regime permanente, para simular o cenário do dia em que foi realizada a campanha de campo com o uso de traçadores fluorescentes. Os dados de vazão e velocidade média obtidos com os ensaios com traçadores auxiliaram a calibrar o modelo hidrodinâmico.

Em seguida, após calibrar o modelo, utilizaram-se os dados de velocidade média estimados pelo HEC-RAS para as Seções 05 e 06, que não obtiveram dados com o experimento de campo, para estimar a curva de passagem dos traçadores fluorescentes por essas seções de monitoramento, tendo em vista que as curvas de passagem nas mesmas não foram obtidas devido à chuva ocorrida no dia do ensaio.

### **5.2.1. MODELO HIDRODINÂMICO (HEC-RAS 4.1)**

O modelo hidrodinâmico HEC-RAS 4.1 foi utilizado neste trabalho para se modelar um trecho de aproximadamente 60 km do rio Piabanha, compreendido entre os

municípios de Petrópolis e Areal. Para se modelar a hidrodinâmica do rio Piabanha, foi necessário conhecer alguns dados hidráulicos e de geometria para alimentação do modelo, sendo estes dados obtidos por meio dos ensaios de campo com traçadores fluorescentes, das medições de topobatimetria e por meio de Modelo Digital de Elevação gerado no *ArcGis*. Os dados de entrada e os resultados estimados pelo modelo e pelo ensaio com traçadores fluorescentes estão apresentados na **Tabela 22**.

**Tabela 22: Dados de entrada do modelo e velocidades médias obtidas por meio do modelo hidrodinâmico HEC-RAS e do ensaio com os traçadores fluorescentes Amidorodamina G e Uranina.**

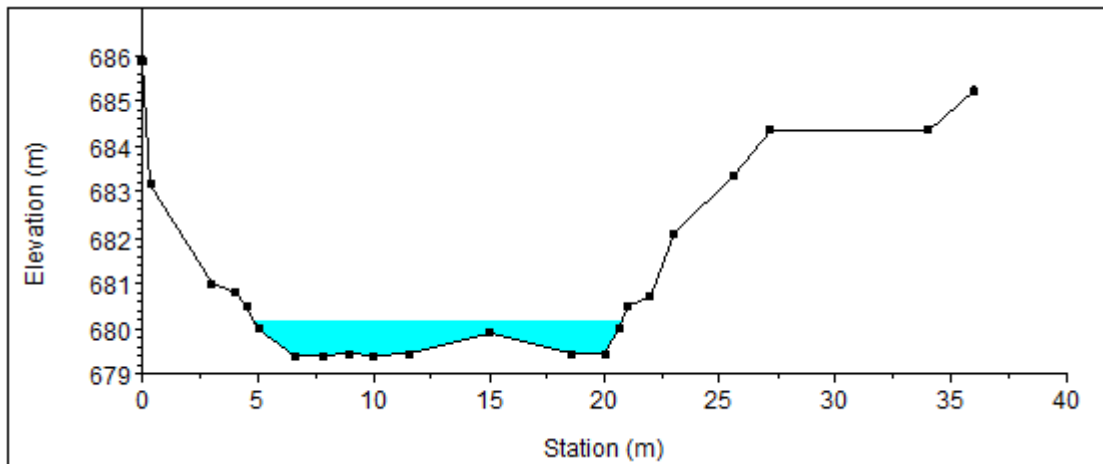
Seções	Distância ao ponto de injeção (km)	COTA MDE (m)	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s)	PROFUNDIDADE (m)	Velocidade Média (m/s)	
					HEC-RAS	Traçadores
Injeção 02	-	813	0,75	0,2	-	-
Seção 01	3,9	805	0,75	0,3	0,28	0,28
Seção 02	6,1	800	1,65	0,3	0,30	0,28
Seção 03	11,6	695	3,40	0,7	0,23	0,22
Seção 04	18,0	681	3,40	0,9	0,42	0,42
Seção 05	23,2	680	6,90	1,5	0,41	-
Seção 06	31,0	640	13,50	2,1	0,47	-
Injeção 01	-	640	13,50	2,1	0,47	-
Seção 07	4,5	629	13,50	2,6	0,53	0,53
Seção 08	7,8	609	13,50	2,3	0,37	0,37
Seção 09	12,0	498	13,50	2,0	0,47	0,47
Seção 10	16,7	470	13,50	1,5	0,36	0,36
Seção 11	25,0	380	40,00	4,5	0,48	0,48

Como observado na **Tabela 22**, os valores de velocidade média estimados pelo modelo hidrodinâmico HEC-RAS se mostraram consistentes quando comparados com os determinados pelo método do uso de traçadores.

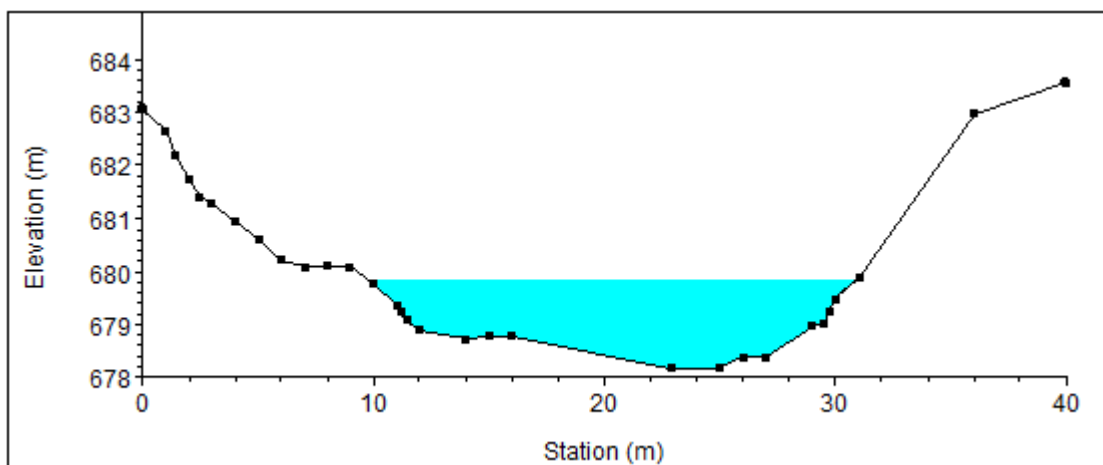
A profundidade fornecida pelo modelo hidrodinâmico para cada seção foi considerada consistente, tendo em vista o que foi observado e medido nas três campanhas de campo realizadas neste estudo.

Com isso, pôde-se concluir que o modelo hidrodinâmico foi devidamente calibrado, fornecendo assim dados confiáveis para as condições de escoamento do dia em que ocorreu o ensaio de campo com traçadores fluorescentes.

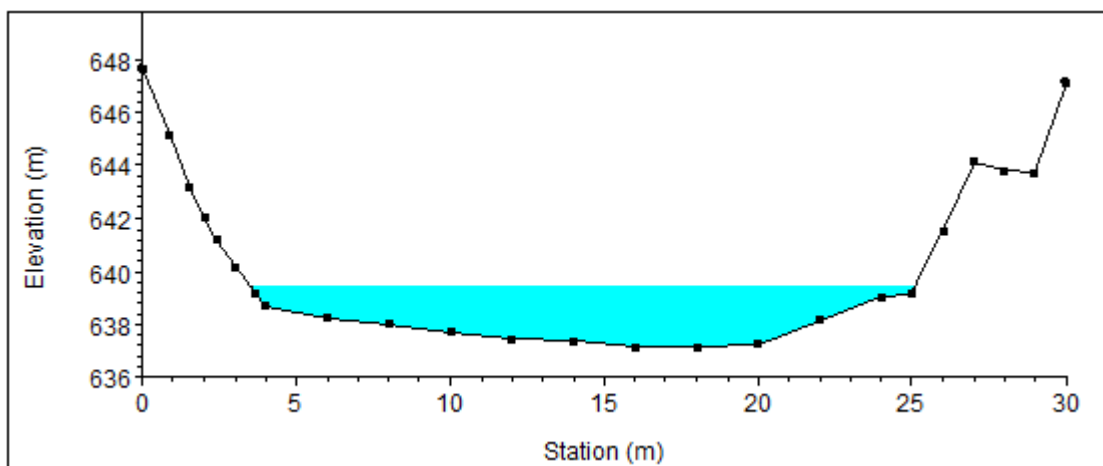
As **Figuras 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114 e 115** apresentam as áreas molhadas de um conjunto de seções transversais obtidas a partir da modelagem hidrodinâmica com o *software* HEC-RAS 4.1 do rio Piabanha.



**Figura 108: Perfil transversal da Seção 04.**



**Figura 109: Perfil transversal da Seção 05.**



**Figura 110: Perfil transversal da Seção 06.**

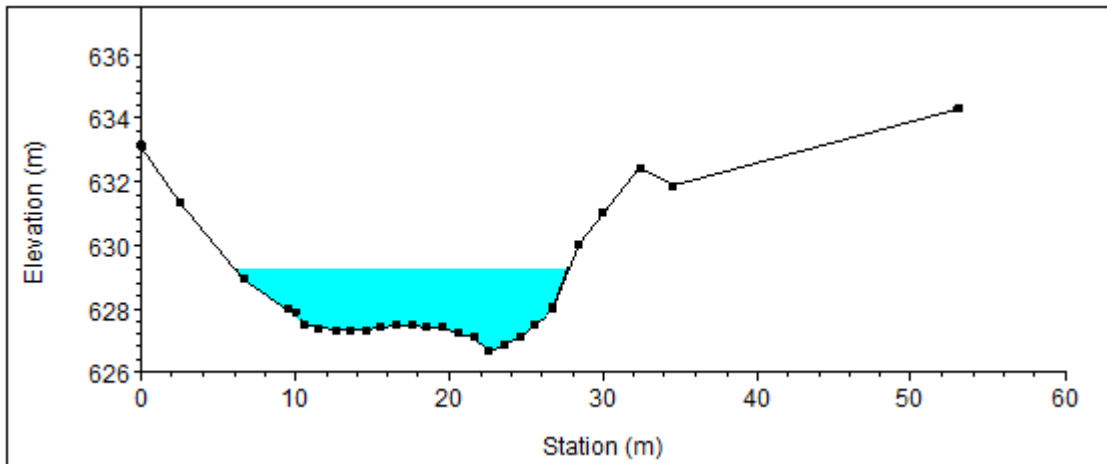


Figura 111: Perfil transversal da Seção 07.

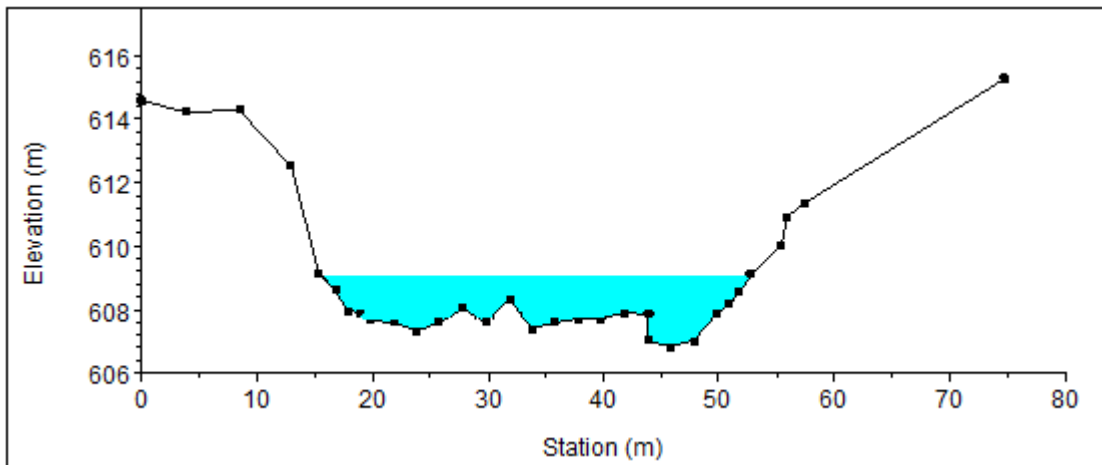


Figura 112: Perfil transversal da Seção 08.

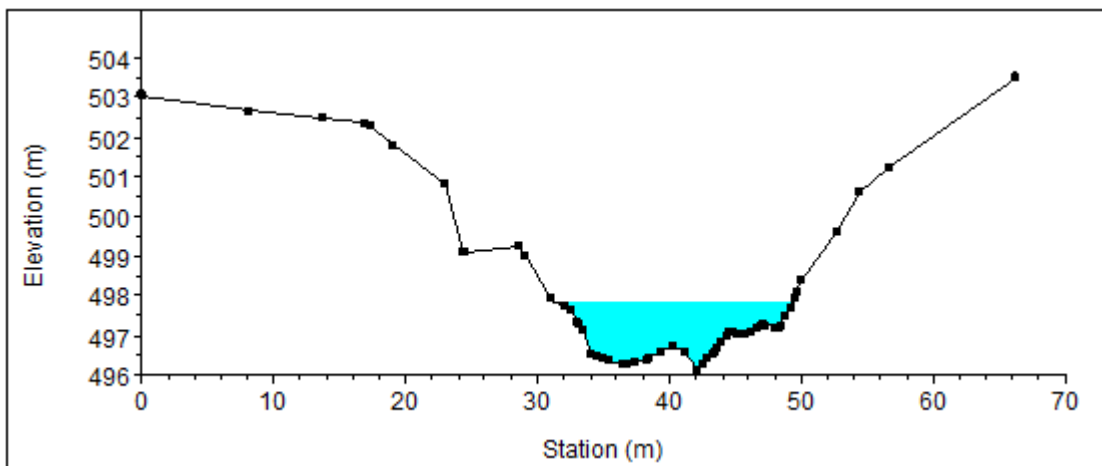
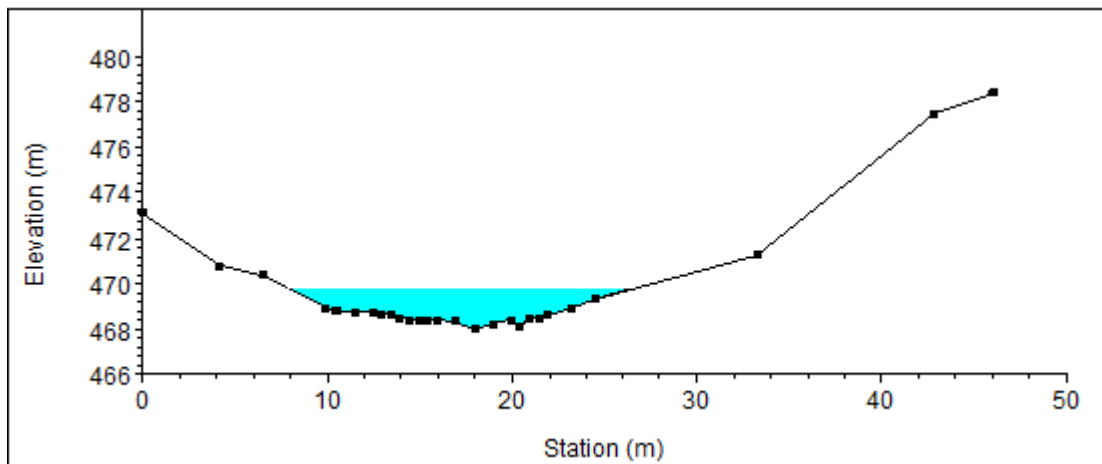
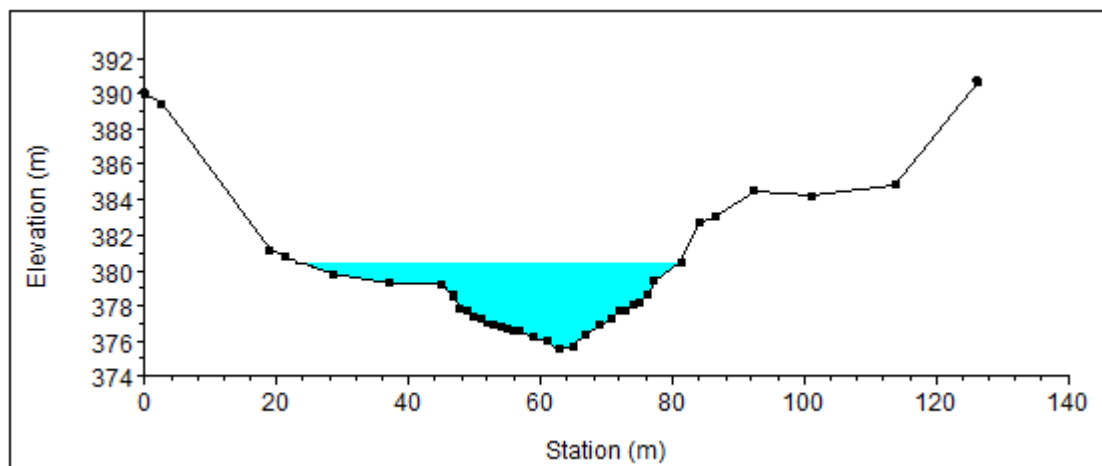


Figura 113: Perfil transversal da Seção 09.





**Figura 114: Perfil transversal da Seção 10.**



**Figura 115: Perfil transversal da Seção 11.**

### 5.2.2. MODELO ANALÍTICO DE TAYLOR

O modelo analítico de Taylor foi utilizado para determinar o coeficiente de dispersão ( $D_L$ ) em trechos do rio Piabanha, pelo método do ajuste da curva de passagem da nuvem de traçador, cujos resultados foram apresentados no subitem 5.1.1.

Contudo, as seções de monitoramento S05 e S06 sofreram com o aumento do volume de água na calha principal do rio Piabanha, extinguindo-se assim a possibilidade de se monitorar a evolução na nuvem de traçador fluorescente nas mesmas.

Assim, utilizou-se a equação de Taylor para prever a curva de concentração versus tempo do traçador fluorescentes Amidorodamina G nas Seções 05 e 06. Para tanto, os dados de vazão, velocidade média e coeficiente de dispersão foram necessários para se estimar a curva de passagem.

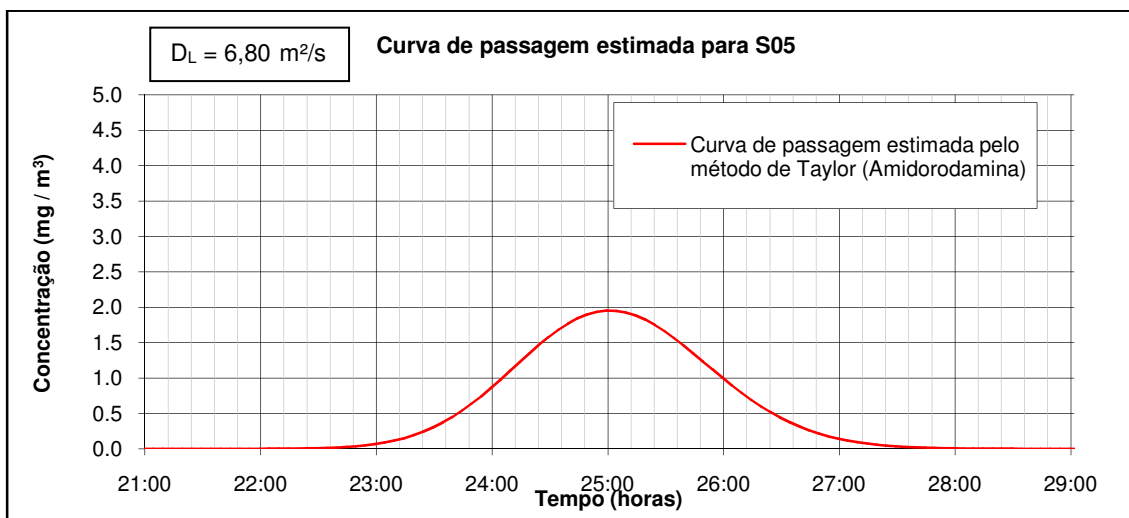
Cabe ressaltar que a estimativa das curvas de passagem da nuvem de traçador pelas seções de monitoramento S05 e S06 foram realizadas para condições típicas do escoamento neste período, isto é, não foi considerada a forte precipitação ocorrida na data do experimento de campo.

Utilizou-se os mesmos valores de vazão líquida do modelo hidrodinâmico HEC-RAS, sendo estes iguais à 6,9 e 13,5 m<sup>3</sup>/s, para S05 e S06, respectivamente.

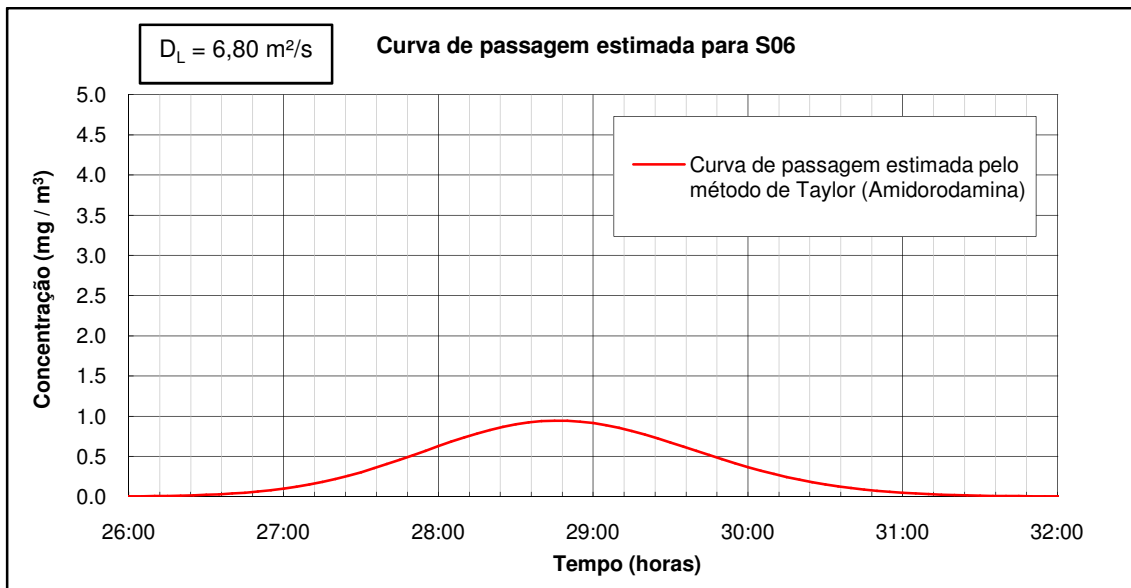
As velocidades médias utilizadas no modelo de Taylor foram obtidas por meio da modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha, que forneceu os valores médios de 0,41 e 0,47 m/s para as Seções 05 e 06, respectivamente.

O coeficiente de dispersão utilizado para se obter as curvas de passagem do traçador fluorescente Amidorodamina G pelas seções de monitoramento S05 e S06 foi de 6,80 m<sup>2</sup>/s, tendo em vista que este foi o valor estimado pela fórmula de Taylor para a Seção 04.

As curvas de passagem da nuvem de traçador fluorescente nas Seções 05 e 06 estão apresentadas nas **Figuras 116 e 117**, respectivamente.



**Figura 116:** Curva de concentração versus tempo estimada para a Seção 05. Velocidade média  $U = 0,41 \text{ m/s}$ .



**Figura 117:** Curva de concentração versus tempo estimada para a Seção 06. Velocidade média  $U = 0,47$  m/s.

As curvas de passagem do traçador fluorescente Amidorodamina G nas Seções 05 e 06 foram estimados a partir de um coeficiente de dispersão determinado pelo uso de traçadores fluorescentes para o trecho da Seção 04. Embora as curvas de passagem estimadas para as Seções 05 e 06 pareçam estar coerentes, devido à concentração máxima da Amidorodamina G diminuir e o tempo de trânsito da nuvem de traçador aumentar, o coeficiente de dispersão utilizado pode não condizer com a realidade dos trechos de S05 e S06. Desse modo, as curvas de passagem simuladas podem não ser a estimativa mais correta para a concentração de um poluente a partir de um despejo acidental/intencional na Seção 00 (Injeção 02).

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral deste trabalho foi de contribuir com conhecimentos teóricos e práticos relacionados a metodologias da capacidade de transporte e dispersão de poluentes solúveis em sistemas fluviais.

O sistema fluvial escolhido para realização deste estudo foi o rio Piabanha, em um trecho limitado pela confluência entre os rios Avelá-Leman e Piabanha, situada no município de Petrópolis e uma ponte lateral a BR 040, localizada aproximadamente a 200 metros, a montante, do reservatório da PCH Piabanha, no município de Areal.

O trecho delimitado para este estudo possui aproximadamente 60 km de extensão, sendo assim superior ao estudo anteriormente realizado no rio Piabanha com traçadores fluorescentes, em 1986 por ROSSO, cuja extensão do experimento de campo foi de 18,6 km, tendo sua injeção de traçadores em Pedro do Rio.

O trecho estudado possui geometria irregular apresentando trechos com baixos e com acentuados declives, calhas com expansão e contração de largura, leito pouco uniforme e alguns trechos com rochas graúdas. Assim, as características da geometria do rio Piabanha dificultam a utilização de métodos convencionais de medidas de parâmetros hidráulicos.

A velocidade média da seção transversal estimada a partir de métodos convencionais pode não ser representativa de um trecho, especialmente em trechos com geometrias muito variadas e grandes variações de declividades, tornando assim inapropriado o uso desta velocidade para calibrar um modelo hidrodinâmico. A técnica com o uso de traçadores fluorescentes mostrou-se adequada para calibração de modelos hidrodinâmicos no rio Piabanha, haja vista que esta técnica fornece valores médios de velocidade para o trecho estudado.

As campanhas de campo com o uso de traçadores fluorescentes foram realizadas neste estudo em condições de vazões “altas-médias”, isto é, no final do período caracterizado como de vazões altas, de acordo com o sub-item 4.1.4. Sendo assim, as condições de transporte e dispersão encontradas, neste trabalho, para situações de despejos acidentais de poluentes solúveis no rio Piabanha representam as condições típicas neste período.

A coleta de amostras em duas verticais, nas seções a jusante do ponto de injeção, se mostrou um método muito eficiente para avaliação da mistura lateral dos traçadores fluorescentes com o corpo hídrico. Assim, baseado em uma boa mistura, o uso de traçadores fluorescentes foi adequado para determinar a vazão líquida do rio Piabanha.

A determinação experimental dos parâmetros de transporte e dispersão foi realizada com sucesso pelo uso da técnica dos traçadores fluorescentes, que forneceu bons resultados para estes parâmetros. Contudo, a Uranina foi menos eficiente perante a Amidorodamina G, devido às perdas excessivas de massa, que resultaram na impossibilidade de determinar a vazão pela curva de passagem da mesma. Em algumas seções de monitoramento, onde a curva de passagem da Uranina foi bem caracterizada e

possuía valores de concentração na faixa de leitura do espectrofluorímetro, houve a possibilidade de determinar a velocidade média, o tempo de trânsito e o coeficiente de dispersão da evolução de um poluente solúvel passivo no rio Piabanha.

Observou-se que no trecho superior do rio Piabanha, nas seções de monitoramento S01 e S02, a concentração de traçador atingiu valores muito altos, conforme apresentado na **Figura 96**. Isto ocorreu devido ao baixo volume de água encontrado no rio Piabanha neste trecho. Com isso, conclui-se que um despejo acidental de poluentes solúveis neste trecho não seria facilmente diluído, tornando assim este trecho do rio extremamente poluído. Pode-se concluir também que devido ao alto número de contribuições diretas de esgoto residencial, a concentração de matéria orgânica é alta neste trecho do rio Piabanha, fato que foi comprovado a partir da perda excessiva de massa da Uranina, que é sensível a presença de matéria orgânica em corpos hídricos.

A geometria complexa e o aumento de vazão ao longo do trecho estudado no rio Piabanha puderam ser notados e quantificados a partir das visitas a campo, do Modelo Digital de Elevação e dos ensaios com o uso de traçadores fluorescentes. A partir do MDE pôde-se quantificar declives acentuados em dois trechos do rio Piabanha, sendo o primeiro localizado na parte superior do rio Piabanha, entre as Seções 02 e 03, mas conhecido como Cachoeira da Cascatinha, que possui um desnível de 105 metros e o segundo localizado no trecho inferior do rio Piabanha, entre as Seções 08 e 09, cujo desnível é de aproximadamente 110 metros. O uso de traçadores fluorescentes possibilitou quantificar a vazão do rio Piabanha, que na Seção 00 (Injeção 02) foi de aproximadamente 0,75 m<sup>3</sup>/s, e por consequência dos deságües dos afluentes, sua vazão se aproximou do valor de 13,50 m<sup>3</sup>/s na Seção 06, seção em Pedro do Rio. No trecho inferior do rio Piabanha, as contribuições laterais são insignificantes até a Seção 10. A jusante de S10, o maior afluente do rio Piabanha, o rio Preto, deságua em sua margem direita, elevando assim a vazão líquida do rio Piabanha para o valor de 40 m<sup>3</sup>/s.

Os valores do tempo de trânsito obtidos por meio das curvas de passagem dos traçadores fluorescentes Amidorodamina G e Uranina para os trechos compreendidos entre a Injeção 02 - Seção 04 e Injeção 01 - Seção 11 foram aproximadamente 17,5 e 15,8 horas, respectivamente. A velocidade média da nuvem de traçador para estes mesmos trechos foram de aproximadamente 0,29 e 0,43, respectivamente.

O Modelo Digital de Elevação desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) da COPPE/UFRJ, a partir de curvas de nível de 10 em 10 metros e calibrado com pontos cotados, da bacia do rio Piabanha, fornecidos pelo INEA foi considerado como uma ótima opção para obtenção de dados de cota, devido a falta e não consistência de dados existentes na região estudada. Embora não se conheça o erro altimétrico envolvido neste MDE, o mesmo foi adequado para a modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha.

Como citado anteriormente, houve dificuldades na aquisição de dados. Foi realizado um levantamento de dados existentes e não se constatou dados de cotas no percorrer do rio Piabanha. Verificaram-se também poucos dados de vazão para o rio Piabanha. No site da ANA foram encontradas apenas 5 estações fluviais com registros de dados para monitorar a vazão de toda a extensão do rio Piabanha. Cabe ressaltar que se buscaram dados de vazão para o dia em que foi realizado o ensaio com traçadores fluorescentes, nas proximidades das seções de monitoramento, mas não se obteve sucesso na obtenção destes dados. Outro problema encontrado foi a falta de dados de geometria de seções transversais no rio Piabanha, tendo em vista a sua importância para realização de modelagens hidrodinâmicas. Em toda a literatura encontrou-se apenas cinco seções topobatimétricas para o rio Piabanha, todas localizadas a montante de Pedro do Rio. Com isso, conclui-se que os levantamentos topobatimétricos de seis seções transversais realizados neste trabalho, todas situadas a jusante de Pedro do Rio, teve grande importância para a modelagem neste estudo e servirá como banco de dados para futuras modelagens. Contudo, observou-se a necessidade de se ter uma maior quantidade de seções com levantamentos topobatimétricos, devido a grande irregularidade da geometria do rio Piabanha. Observou-se também a necessidade de se ter um monitoramento da vazão mais intensivo, tendo em vista que o rio Piabanha tem afluentes consideráveis, que por vezes, possuem vazões próximas ou superiores a do rio Piabanha.

A implementação do modelo hidrodinâmico HEC-RAS 4.1 neste estudo foi considerada um sucesso, pois simulou coerentemente as condições hidrodinâmicas presentes na data em que foi realizado o ensaio de campo com traçadores fluorescentes.

A vazão e velocidade média obtidas por meio das medições convencionais neste estudo não foram adequadas para uso na modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha uma vez que a velocidade média da seção transversal não representa adequadamente a

velocidade média do trecho, devido à heterogeneidade da geometria da calha do rio ao longo do rio Piabanha. Adicionalmente, as campanhas foram realizadas em épocas de seca. Vale ressaltar que devido à geometria irregular do rio Piabanha, há grande dificuldade de realizar medições convencionais de vazão e velocidade média em alguns trechos.

Os resultados obtidos por meio dos traçadores fluorescentes foram utilizados para calibrar o modelo hidrodinâmico, sendo assim fundamental no processo de modelagem deste estudo. Com isso, concluiu-se que o uso da técnica de traçadores fluorescentes em rios naturais é uma ferramenta muito útil também para auxiliar estudos de modelagens hidrodinâmicas em rios com geometria complexa.

### **Recomendações**

O estudo das características de transporte e dispersão do rio Piabanha foi feito a partir de ensaios com os traçadores fluorescentes Amidorodamina G e Uranina, e como observado, a Uranina não apresentou bons resultados em todas as seções de monitoramento deste estudo. Assim, recomenda-se que sejam utilizados sempre dois traçadores fluorescentes para realização de ensaios de campo, devido a possíveis perdas na massa dos mesmos.

Determinar a vazão pelo método do uso de traçadores fluorescentes se mostrou eficiente nas seções estudadas do rio Piabanha. Levando-se em consideração a necessidade de conhecer a vazão dos principais afluentes do rio Piabanha, o método pode ser usado para determinar a mesma.

A modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha foi realizada, neste estudo, apenas em regime permanente, devido à falta de dados e a dificuldade de acesso aos existentes. Contudo, para futuros estudos, recomenda-se modelar a hidrodinâmica do rio Piabanha em regime não permanente, simulando assim a passagem de um transiente.

A utilização de um modelo de transporte e de qualidade de água, QUAL2E, HEC-RAS, dentre outros, no rio Piabanha é recomendada para simular a evolução de um poluente solúvel passivo, decorrentes de despejo acidental, e suas conseqüências para a qualidade da água.

Observou-se, neste estudo, a possibilidade do modelo hidrodinâmico HEC-RAS em ajudar na escolha de novas seções no planejamento de um futuro ensaio de campo com traçadores fluorescentes.

A partir da utilização do HEC-RAS para modelar a hidrodinâmica do rio Piabanha, observou-se a necessidade de uma maior quantidade de seções com dados topobatimétricos. Assim, sugere-se o levantamento topobatimétrico das seções de monitoramento do ensaio com traçadores (Seções 00, 01, 02 e 03) e de seções intermediárias às seções utilizadas no ensaio com traçadores fluorescentes.

Diante da importância do rio Piabanha, recomenda-se campanhas intensivas para determinar a vazão em diferentes períodos do ano e levantamentos topobatimétricos de seções transversais, com amarração de cotas, por toda a extensão do rio Piabanha, a fim de obter uma coletânea de dados que podem ser futuramente utilizados em modelagens.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, V. M., **Avaliação de efeitos de cargas poluidoras oriundas de acidentes rodoviários na qualidade de água. Estudo de caso do médio Paraíba do Sul – RJ.** Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

AZEREDO, S. V. **Modelagem hidrodinâmica de decantador primário de esgotos utilizando-se a técnica de traçadores.** M.Sc. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1985.

BARBOSA JR., A. R.; SILVA, G. Q.; NEVES, B. V. B.; DEVENS, J. A., “Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d’água naturais Parte 1 - Fundamentos teóricos”, **Revista Escola de Minas**, Vol. 58, Nº1, 2005.

BARBOSA, F. R. **Modelagem computacional do campo de diluição de emissários submarinos com suporte de técnicas de traçadores e sensoriamento remoto.** M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2012.

BARROS, V. R. **Avaliação da evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL e imagens Landsat5-TM – estudo de caso: bacia do rio Piabanha/RJ.** M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2012.

BHERENS, H. “Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers”, **Hydrogeology Journal**, volume 9, pp. 321-325, 2001.

CASTRO, T. B. **Estudo de misturamento de traçadores em tubulações curtas de usinas hidrelétricas.** M.Sc. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2000.

CHAGAS, R. M. **Modelagem hidrodinâmica no baixo São Francisco e análise da quantidade e da qualidade de água para irrigação.** M.Sc. Programa de Mestrado em Agroecossistemas, Universidade Federal de Sergipe, 2009.

CHOW, V. T., **Open-Channel Hydraulics.** International Edition. Singapore, McGraw-Hill Book, 1973.

CONDE, R. A. N. G. **Análises de sensibilidade em modelação numérica de escoamentos em leito móvel com HEC-RAS. Aplicação ao rio Mondego.** M.Sc.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

COPPE/UFRJ, **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – Caderno de Ações da Bacia do Rio Piabanha**. In: Relatório Contratual R-10, elaborado como parte dos documentos que compõem o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Paraíba do Sul, ANA, LabHid COPPE/UFRJ, Fundação COPPETEC, 2006.

COPPETEC-COPPE-UFRJ. “Projeto EIBEIX-I: Estudos Integrados de Bacias Experimentais – Parametrização Hidrológica na Gestão de Recursos Hídricos das Bacias da Região Serrana do Rio de Janeiro”. In: **Relatório Técnico Parcial 2, Chamada Pública MCT/FINEP/CT-HIDRO – Bacias Representativas 04/2005**. Elaborado conjuntamente pela fundação COPPETEC-COPPE-UFRJ com colaboração do IGEO-UFRJ-UERJ-CPRM-SERLA (INEA), 2010.

CUNHA, C. N., DIAS, N. “Modelagem de transporte de escalares em rios”. In: **I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul**, 2006, Curitiba. CD-ROM, 2006.

DEVENS, J. A. **Quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal em pequenos cursos d’água naturais com o uso de traçador ambientalmente neutro**. M.Sc. Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2006.

ECOTEMA, **Plano de Manejo da APA Petrópolis**. In: Documento Final Interno Revisado (Atividade 8 do Contrato nº 4530202362, de 22/07/04, entre a CEG RIO e o INSTITUTO ECOTEMA), Petrópolis, Rio de Janeiro, 2004.

ENOMOTO, C. F. **Método para elaboração de mapas de inundação, estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná**. M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FERNANDES, L. D. F. **Transporte de poluentes em estuários**. Trabalho final de curso da licenciatura em Engenharia do Ambiente, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2001.

FLURY, M. e WAI, N. N. N. **Dyes as tracer for vadose zone hydrology**. Department of Crop and Soil Research. Center for Multiphase Environmental Research. Washington State University. Pullman, Washington, USA, 2003.

FONTURA, J. A. S. e NIENCHESKI, L. F. H. “Metodologia para utilização do traçador fluorescente “Rodamina B” no estudo da dispersão superficial, adaptada para aplicação no estuário da Lagoa dos Patos”. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Volume 8, p. 105-116, Setembro de 2003.

GIORI, J. Z. **Análise dos efeitos de despejos acidentais de poluentes em corpos hídricos usando traçadores fluorescentes – Estudos de caso: Bacia do rio Guandu/RJ**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

GONÇALVES, R. C. **Modelagem Hidrológica do tipo chuva-vazão via SMAP e TOPMODEL - Estudo de Caso: Bacia do Rio Piabanha/RJ**. Dissertação de M.Sc, Curso de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

HUBBARD, L. A., KILPATRICK, F.A., MARTENS, L.A., WILSON, J. F. **Measurement of time of travel and dispersion in streams by dye tracing**. Techniques of Water Resources Investigations of the US Geological Survey, Book3: Applications of Hydraulics, Washington, 1982.

KLING, A. S. M. **Aplicação do Método Battelle na avaliação do impacto ambiental na Bacia Hidrográfica do rio Piabanha**. Dissertação apresentada à Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca para obtenção do grau de Mestre em Ciências na área de Saúde Pública, 2005.

LEVENSPIEL, O. e SMITH, W. K. “Notes on the Diffusion-type model for the longitudinal mixing of fluids in flow”. **Chemical Engineering Science**, Vol. 6, pp. 227-233, 1957.

LIVI, C. P. **Fundamentos de fenômenos de transporte: um texto para cursos básicos**. Rio de Janeiro: Sub-Reitoria de Ensino de Graduação e Corpo Discente, UFRJ. vol. 2. (Cadernos didáticos UFRJ, 30), 1997.

LOU, R. F. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ**. Dissertação de M.Sc, Curso de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

MACHADO, M. B., **Modelagem tridimensional da dispersão de poluentes em rios**. Tese de D.Sc., Unicamp, São Paulo, SP, 2006.

MENEGASSI, J., VILHENA, M. T. M. B. e SOUTO, S. L. L. **Modelo Matemático de dispersão de poluentes não degradáveis aplicado aos rios dos Sinos e Gravatai**. Escola de Engenharia da UFRGS, Rio Grande do Sul, 1977.

MIGUEZ, M. G. **Modelação matemática de grandes planícies de inundação, através de um esquema de células de escoamento, com aplicação ao Pantanal Matogrossense**. M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1994.

MOLINARI, B. S. **Avaliação da vazão ecológica do ponto de vista da qualidade das águas na bacia do rio Piabanha/RJ**. Monografia realizada para grau de graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2011.

OKUBO, A. "A new set of oceanic diffusion diagrams". **Technical report 38**. Chesapeake Bay Institute. The Johns Hopkins University. 47 p, 1968a.

OLIVEIRA, R. A. F. **Propagação de ondas de despacho e controle de inundações na bacia do Paraíba do Sul**. M. Sc. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

OPPA, L. F. **Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do rio Vacacaí Mirim**. M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2007.

PAIVA, R. C. D., COLLISCHONN, W., BRAVO, J. M. "Modelo hidrodinâmico 1D para redes de canais baseado no esquema numérico de MacCormack" **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, volume 16, pp, 151-161, 2011.

PAULA, T. P. **Diagnóstico e modelagem matemática da qualidade da água em trecho do rio Piabanha/RJ**. Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

PAULO, R. G. F. **Ferramentas para determinação de vazões ecológicas em trechos de vazão reduzida: destaque para aplicação do método do perímetro molhado no caso de Capim Branco I**. M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2007.

PECLY, J. O. G. **Monitoramento ambiental do emissário submarino de Ipanema usando traçadores e técnicas geoestatísticas.** Dissertação de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

PEREIRA, F. F. **Modelo hidrodinâmico e de transporte bidimensional de grade não estruturada para lagos raso.** M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PEREIRA, R. S. **Processos que regem a qualidade da água da Lagoa dos Patos, segundo o modelo DELFT3D.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande-RS, 2003.

PNUD – MPO/SEPURB/PQA – ABC – UFRJ/COPPE, **Diagnóstico Preliminar das Condições Hidrossedimentológicas do rio Paraíba do Sul e de Seus Principais Afluentes,** Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul, Projeto BRA/96/017, 1997.

PONTES, P. R. M. **Comparação de modelos hidrodinâmicos simplificados de propagação de vazão em rios e canais.** M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2011.

RAMOS, V. S., **Uso das técnicas de radiotraçadores e de contagem total em medidas de vazão de sistemas abertos.** Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

REIS, J. S. A. **Modelagem matemática da qualidade de água para o alto rio das Velhas/MG.** M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2009.

RIBEIRO, C. B. M. e LIMA, R. N. S. “Simulação de inundações urbanas a partir da integração de técnicas de geoprocessamento à modelagem hidráulica e hidrológica.” **Revista de Geografia – PPGE**, volume 2, nº1, pp. 1-9, 2011.

RIBEIRO, C. B. M., **Sistema de alerta ambiental fundamentado em estudo teórico-experimental de transporte e dispersão de poluentes solúveis em cursos d’água.** Tese de D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, 2007.

RIGO, D. **Dispersão longitudinal em rios: desempenho de métodos de previsão e de traçadores fluorescentes**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 1992.

ROCHA, H. L., SILVA, R. V. e KOBIYAMA, M. “Propagação de onda de cheia em canais simplificados: estudo comparativo de modelo hidrodinâmico e Muskingum-Cunge.” **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009.

ROLDÃO, J. S. F e GORETKIN, G. “Calibração de modelos matemáticos aplicáveis à simulação do transporte e dispersão em águas costeiras. Uso de traçadores fluorescentes”. **Anais do 1º seminário de modelagem numérica do mar**, pp. 269-280, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 12 a 14 de dezembro de 1984.

ROLDÃO, J. S. F. **Dispersão de traçadores em medições de vazões em tubulações**. M.Sc.Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1973.

ROLDÃO, J. S. F., LEAL, L. C. P., PECLY, J. O. G. “Medições de vazões nos túneis de desvio das barragens de Serra da Mesa e Corumbá usando traçadores fluorescentes”. **XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, volume 4, pp, 169-176, 1997.

ROLDÃO, J. S. F., PECLY, J. O. G, VALENTINI, E., LEAL, L. “Evaluation of Sewage Outfalls by Using Tracer Techniques Combined with Oceanographic Measurements”. **In: Environmental Coastal Regions 98**, volume 1, pp 209-218, Cancun, Mexico, Setembro, 1998b.

ROLDÃO, J. S. F., PECLY, J. O. G. **Traçadores em Hidrologia**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PEC/COPPE/UFRJ, Apostila e notas de aula do curso COC 717 – Laboratório de Traçadores – Caixa Postal 68506, Rio de Janeiro, 2011.

ROLDÃO, J. S. F., PECLY, J. O. G., “Determinação da vazão e da dispersão longitudinal nos rios Corumbá e Pirapetinga através do emprego de traçador fluorescente”. **II Simpósio de Recursos Hídricos Del Cono Sur**, Santa Fe, Argentina, Agosto, 1998a.

ROLDÃO, J. S. F., PECLY, J. O. G., TRENTO, A., “Determinação de coeficientes de dispersão mediante traçadores fluorescentes na laguna Setubal (Argentina)”. **In: anais do XVII Congresso Latino americano de Hidráulica (IAHR)**, volume 1, pp 57-68, Quayaquil, Equador, Outubro, 1996.

ROLDÃO, J. S. F., WILSON JR., G., SOARES, J. H. P., PECLY, J. O. G., LEAL, L. C. P. “Determinação da capacidade de diluição de um emissário submarino com utilização de traçador fluorescente”. **In: Anais do XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, volume 1, pp 427-432, Recife, Pernambuco, Novembro, 1995.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**, Engenharia Costeira e Oceanográfica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

ROSSO, T. C. A. **Determinação do coeficiente de dispersão em rios, através de traçadores radioativos e fluorescentes**. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1986.

SOARES, J. H. P., RIBEIRO, A. C. J., GUEDES, H. A. S. “Avaliação da capacidade de transporte e dispersão do rio Paraibuna utilizando traçadores fluorescentes. Trecho: Distrito Industrial a UHE Marmelos – Juiz de Fora/MG”. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 15, n.3, pp. 45-56, 2010.

SOUZA, R. S. **Determinação de vazão turbinada com emprego de traçador fluorescente**. M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1997.

TAYLOR, G. “The Dispersion of Matter in Turbulent Flow Through a Pipe”. **Proceedings of The Royal Society of London**. Série A223, pp. 446-468, 1954.

VERÓL, A. P. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional**. M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2010.

VICENTE, T. S. S. **Modelo de transporte de óleo baseado no esquema numérico ADI**. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

WILSON JR., G. **Ciclo de Erosão**. Escola Politécnica da UFRJ – DRHIMA. Notas de aula da disciplina EEH593 – Transporte de Sedimentos, Rio de Janeiro, 2011.

WILSON JR., J.F., COBB, E. D., KILPATRICK, F. A. **Techniques of water-resources investigations of the United States Geological Survey. Fluorimetric**

**procedures for dye tracing.** Book 3 – Applications of Hydraulics, 34 pp, U. S. Geological Survey, 1986.



## SITES CONSULTADOS

Portal do comitê do rio Piabanha. Acessado em abril de 2012. Disponível em: <http://www.cbhpiabanha.org.br/index.php> .

Portal do comitê do rio Piabanha. Acessado em abril de 2012. Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/downloads2011/Boletim%20piabanha1.pdf>

Portal do comitê do rio Piabanha. Acessado em abril de 2012. Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/downloads2011/PIABANHA.pdf>

Portal do comitê do rio Piabanha. Acessado em abril de 2012. Disponível em: [http://ceivap.org.br/organismo\\_2\\_3.php](http://ceivap.org.br/organismo_2_3.php)

Portal da EPA. Acessado em abril de 2012. Disponível em: <http://www.epa.gov/>

Portal do INEA. Acessado em Abril de 2012. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/recursos/comite.asp>

Referência Técnica do SisBaHiA. Acessado em Maio de 2012. Disponível em: [http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V85.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V85.pdf)

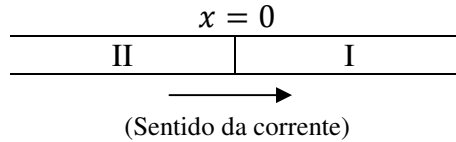
Portal do CONCAR – Comissão Nacional de Cartografia. Acessado em Novembro de 2012. Disponível em: <http://www.concar.ibge.gov.br/detalheDocumentos.aspx?cod=8>

HidroWeb. Acessado em Janeiro de 2013. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>

## APÊNDICE

Desenvolvimento da fórmula de Taylor realizado por MENEGASSI *et al.* (1977) para um lançamento pontual instantâneo.

O lançamento é feito na origem do sistema de coordenadas.



As condições de fronteira para o lançamento pontual instantâneo são:

1.  $C_I(\infty, t) = 0 \quad \forall t > 0$
2.  $C_{II}(-\infty, t) = 0 \quad \forall t > 0$
3.  $C_I(0, t) = C_{II}(0, t) \quad \forall t > 0$
4.  $D_L A \left\{ \frac{\partial C_{II}(0, t)}{\partial x} - \frac{\partial C_I(0, t)}{\partial x} \right\} = f(t), \quad \text{onde } f(t) = M\delta(t)$

Sendo  $\delta(t)$  a distribuição delta de Dirac. Satisfaz a seguinte condição:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\vec{r}) d^3\vec{r} = 1$$

A equação de transporte de massa a uma dimensão ( $x$ ) com as condições acima citadas descreve matematicamente o lançamento pontual instantâneo.

Definindo-se a transformada de Laplace de  $C(x, t)$  como

$$\mathcal{L}\{C(x, t); t \rightarrow s\} = \bar{C}(x, s) \quad \text{Re } \{s\} > 0$$

Usando as seguintes propriedades da transformada de Laplace

$$\mathcal{L}\left\{\frac{\partial^n C(x, t)}{\partial x^n}; t \rightarrow s\right\} = \frac{\partial^n \bar{C}(x, s)}{\partial x^n} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\mathcal{L}\left\{\frac{\partial C(x, t)}{\partial t}; t \rightarrow s\right\} = s\bar{C}(x, s) - C(x, 0)$$

E, aplicando-se a transformada de Laplace à equação de transporte de massa unidimensional

$$D_L \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} - U \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} - KC(x, t) = \frac{\partial C(x, t)}{\partial t}$$

Obtém-se a seguinte equação transformada

$$D_L \frac{\partial^2 \bar{C}(x, s)}{\partial x^2} - U \frac{\partial \bar{C}(x, s)}{\partial x} - K\bar{C}(x, s) = s\bar{C}(x, s) - C(x, 0)$$

Aplicando-se as condições (1) e (2), obtém-se a seguinte equação

$$D_L \frac{\partial^2 \bar{C}(x, s)}{\partial x^2} - U \frac{\partial \bar{C}(x, s)}{\partial x} - (K + s)\bar{C}(x, s) = 0$$

A solução desta equação é a seguinte

$$\bar{C}(x, s) = A_{(s)} e^{r_1 x} + B_{(s)} e^{r_2 x}$$

onde:

$$r_1 = \frac{U + \sqrt{U^2 + 4KD_L + 4D_L s}}{2D_L}$$

$$r_2 = \frac{U - \sqrt{U^2 + 4KD_L + 4D_L s}}{2D_L}$$

Aplicando-se este resultado aos meios I e II, resulta nas seguintes equações

$$C_I(x, s) = A_{1(s)} e^{r_1 x} + B_{1(s)} e^{r_2 x} \quad x > 0$$

$$C_{II}(x, s) = A_{2(s)} e^{r_1 x} + B_{2(s)} e^{r_2 x} \quad x < 0$$

As condições de fronteira transformadas são:

1.  $\bar{C}_I(\infty, s) = 0$   $Re \{s\} > 0$
2.  $\bar{C}_{II}(-\infty, s) = 0$   $Re \{s\} > 0$
3.  $\bar{C}_I(0, s) = \bar{C}_{II}(0, s)$   $Re \{s\} > 0$
4.  $D_L A \left\{ \frac{\partial \bar{C}_{II}(0, s)}{\partial x} - \frac{\partial \bar{C}_I(0, s)}{\partial x} \right\} = \mathcal{L}\{M\delta(t); t \rightarrow s\} = M$

Condição 1)  $A_{1(s)} = 0$

Condição 2)  $B_{2(s)} = 0$

Condição 3)  $A_{1(s)} = B_{2(s)} = D_{(s)}$

Condição 4)  $D_L A \{r_2 D_{(s)} - r_1 D_{(s)}\} = M$

$$\text{Ou } D_{(s)} = \frac{M}{D_L A (r_2 - r_1)} = \frac{M}{A \sqrt{U^2 + 4KD_L + 4D_L S}}$$

Assim, temos

$$\bar{C}_I(x, s) = \frac{M}{A \sqrt{U^2 + 4KD_L + 4D_L S}} \exp\left(\frac{U - \sqrt{U^2 + 4KD_L + 4D_L S}}{2D_L} x\right) \quad x > 0$$

$$\bar{C}_{II}(x, s) = \frac{M}{A \sqrt{U^2 + 4KD_L + 4D_L S}} \exp\left(\frac{U + \sqrt{U^2 + 4KD_L + 4D_L S}}{2D_L} x\right) \quad x < 0$$

A transformada inversa de Laplace é calculada à partir do resultado:

$$\mathcal{L}\left\{\frac{e^{-c/t}}{\sqrt{t}}; t \rightarrow s\right\} = \sqrt{\frac{\pi}{s}} e^{-2\sqrt{cs}} \quad \begin{array}{l} \text{Re}\{c\} > 0 \\ \text{Re}\{s\} > 0 \end{array}$$

Ou seja,

$$\int_0^{\infty} \frac{e^{-c/t}}{\sqrt{t}} e^{-st} dt = \sqrt{\frac{\pi}{s}} e^{-2\sqrt{cs}}$$

Sendo assim

$$\int_0^{\infty} \frac{e^{-c/t}}{\sqrt{t}} e^{-(U^2 + 4KD_L + 4D_L S)t} dt = \sqrt{\frac{\pi}{U^2 + 4KD_L + 4D_L S}} \exp^{-2(\sqrt{C(U^2 + 4KD_L + 4D_L S)})x}$$

Tomando-se

$$C = \frac{x^2}{16(D_L)^2} \quad t = \frac{t'}{4D_L}$$

Resulta em

$$\int_0^{\infty} e^{-st} \cdot e^{-\left(\frac{U^2+4KD_L}{4D_L}\right)t'} \cdot \frac{e^{-\frac{x^2}{4D_L t'}}}{2\sqrt{D_L t'}} dt' = \sqrt{\frac{\pi}{U^2 + 4KD_L + 4D_L s}} \cdot \exp\left(\frac{\sqrt{U^2+4KD_L+4D_L s}}{2D_L}x\right)$$

Sendo  $t'$  uma variável muda de integração ( $t' = t$ ). Usando-se a propriedade

$$\mathcal{L}^{-1}\{K\bar{f}(s); s \rightarrow t\} = K\mathcal{L}^{-1}\{\bar{f}(s); s \rightarrow t\}$$

Onde  $K$  é uma constante, resulta  $\left(K = e^{\frac{-Ux}{2D_L}}\right)$

$$\mathcal{L}^{-1}\{C_I(x, s); s \rightarrow t\} = \frac{M}{2A\sqrt{\pi D_L t}} \cdot e^{\frac{-Ux}{2D_L}} \cdot e^{\left(\frac{-(U^2+4KD_L)}{4D_L t}\right)t^2} \cdot e^{\frac{-x^2}{2D_L t}}$$

Ou

$$\mathcal{L}^{-1}\{C_I(x, s); s \rightarrow t\} = \frac{M}{2A\sqrt{\pi D_L t}} \cdot \exp\left(\frac{-(x-Ut)^2}{4D_L t} - Kt\right)$$

Ou seja

$$C_I(x, t) = \frac{M}{2A\sqrt{\pi D_L t}} \cdot \exp\left(\frac{-(x-Ut)^2}{4D_L t} - Kt\right)$$

Sendo  $K = 0$  para poluentes não degradáveis.

Tabela 23: Coordenadas dos marcos de cada seção transversal e das distâncias e elevações referentes a cada um dos marcos.

Seção Transversal (S04) <sup>1</sup>		Seção Transversal (Pq. Municipal) <sup>1</sup>		Seção Transversal (S05) <sup>1</sup>		Seção Transversal (S06) <sup>1</sup>		Seção Transversal (S07) <sup>2</sup>	
Coordenadas UTM WGS 84		Coordenadas UTM WGS 84		Coordenadas UTM WGS 84		Coordenadas UTM WGS 84		Coordenadas UTM WGS 84	
E	692190	E	692070	E	692083	E	692364	E	692768
N	7519133	N	7521240	N	7523147	N	7528830	N	7533144
Dist. <sup>3</sup>	Elevação	Dist. <sup>3</sup>	Elevação	Dist. <sup>3</sup>	Elevação	Dist. <sup>3</sup>	Elevação	Dist. <sup>3</sup>	Elevação
0	685.89	0	684.56	0	683.07	0	647.65	0	633.11
0.5	683.19	1	684.01	1	682.67	0.9	645.15	2.47	631.37
3	680.99	2	683.76	1.4	682.17	1.5	643.15	6.59	628.93
4	680.79	3	683.41	2	681.72	2	642.05	9.54	628,00 <sup>4</sup>
4.5	680.49 <sup>4</sup>	4	683.56	2.5	681.42	2.4	641.15	10.04	627.88
5	679.99	5	683.41	3	681.27	3	640.15	10.54	627.52
6.6	679.39	6.5	682.56	4	680.92	3.65	639,15 <sup>4</sup>	11.54	627.38
7.8	679.39	7	681.56	5	680.62	4	638.7	12.54	627.33
8.9	679.44	7.95	680.36	6	680.22	6	638.2	13.54	627.31
10	679.39	8.5	679.56 <sup>4</sup>	7	680.07	8	638	14.54	627.31
11.6	679.44	11	678.61	8	680.1	10	637.7	15.54	627.44
15	679.89	12	678.61	9	680.07	12	637.45	16.54	627.45
18.6	679.44	14	679.06	10	679.77	14	637.35	17.54	627.46
20	679.44	18	679.51	11	679.37	16	637.15	18.54	627.43
20.6	679.99	20.5	678.76	11.2	679.22 <sup>4</sup>	18	637.15	19.54	627.41
21	680.49 <sup>4</sup>	22.6	679.56 <sup>4</sup>	11.45	679.07	20	637.25	20.54	627.22
22	680.69	22.9	680.71	12	678.87	22	638.15	21.54	627.09
23	682.09	24.3	681.71	14	678.72	24	639	22.54	626.67
25.6	683.39	24.6	681.76	15	678.77	25	639,15 <sup>4</sup>	23.54	626.85
27.2	684.39	25	682.86	16	678.77	26	641.5	24.54	627.11
34	684.39	29	683.56	22.9	678.17	27	644.15	25.54	627.48
36	685.24	36	683.56	25	678.17	28	643.8	26.68	628,00 <sup>4</sup>
				26	678.37	29	643.75	28.37	630.04
				27	678.37	30	647.15	29.99	631.04
				29	678.97			32.40	632.44
				29.5	679.02			34.49	631.87
				29.75	679.22 <sup>4</sup>			53.09	634.31
				30	679.47				
				31	679.87				
				36	682.97				
				40	683.57				

<sup>1</sup> : Seções retiradas do estudo de LOU (2010).

<sup>2</sup> : Seções determinadas em trabalho de campo deste estudo.

<sup>3</sup> : Distância a partir do marco de cada seção transversal, tomada da esquerda para a direita.

<sup>4</sup> : Nível da água.

Tabela 24: Coordenadas dos marcos de cada seção transversal e das distâncias e elevações referentes a cada um dos marcos.

Seção Transversal (S08) <sup>2</sup>		Seção Transversal (S09) <sup>2</sup>		Seção Transversal (S10) <sup>2</sup>		Seção Transversal (S19) <sup>2</sup>		Seção Transversal (S11) <sup>2</sup>	
Coordenadas UTM WGS 84		Coordenadas UTM WGS 84		Coordenadas UTM WGS 84		Coordenadas UTM WGS 84		Coordenadas UTM WGS 84	
E	694940	E	697238	E	697185	E	695632	E	692303
N	7534019	N	7535843	N	7538969	N	7540079	N	7542263
Dist. <sup>3</sup>	Elevação	Dist. <sup>3</sup>	Elevação	Dist. <sup>3</sup>	Elevação	Dist. <sup>3</sup>	Elevação	Dist. <sup>3</sup>	Elevação
0	614.60	0	503.03	0	473.12	0	445.20	0	390.02
3.80	614.23	8.37	502.67	4.12	470.78	9.60	445.66	2.48	389.46
8.44	614.29	17.44	502.28	6.50	470.40	12.13	445.74	18.90	381.15
12.90	612.54	23.79	500.80	9.93	468,89 <sup>4</sup>	13.33	444.56	21.48	380.75
15.35	609,14 <sup>4</sup>	25.22	499.11	10.43	468.81	17.17	443.16	28.38	379.82
16.81	608.62	29.57	499.04	10.49	468.77	20.36	441.16	37.13	379.29
17.81	607.95	32.04	497,73 <sup>4</sup>	11.43	468.74	21.72	439,28 <sup>4</sup>	44.98	379.17
18.81	607.90	33.65	497.12	11.50	468.72	22.92	438.94	46.60	378,63 <sup>4</sup>
19.81	607.66	34.16	496.52	12.43	468.69	23.92	438.47	46.90	378.48
21.81	607.60	34.66	496.50	12.93	468.67	24.92	438.13	47.90	377.88
23.81	607.34	35.16	496.43	13.43	468.59	25.92	438.12	48.90	377.63
25.81	607.60	35.66	496.37	13.93	468.47	26.92	438.02	49.90	377.29
27.81	608.02	36.66	496.30	14.43	468.39	27.92	437.79	50.90	377.22
29.81	607.60	37.66	496.35	14.93	468.42	28.92	438.01	51.90	377.07
31.81	608.34	38.66	496.43	15.43	468.39	29.92	438.10	52.90	376.93
33.81	607.38	39.66	496.74	15.93	468.40	30.92	438.20	53.90	376.79
35.81	607.62	40.66	496.72	16.93	468.29	31.92	438.29	54.90	376.71
37.81	607.71	41.66	496.61	17.93	467.99	32.92	438.29	55.90	376.60
39.81	607.71	42.66	496.30	18.93	468.21	33.92	438.30	56.90	376.55
41.81	607.90	43.66	496.69	19.93	468.41	34.92	438.33	58.90	376.25
43.81	607.85	44.66	497.10	20.43	468.07	35.92	438.34	60.90	375.99
43.81	607.06	45.66	497.06	20.93	468.47	36.92	438.36	62.90	375.57
45.81	606.79	46.66	497.18	21.43	468.44	37.92	438.39	64.90	375.69
47.81	607.00	47.66	497.25	21.93	468.59	38.92	438.39	66.90	376.37
49.81	607.89	48.66	497.48	23.28	468,89 <sup>4</sup>	39.92	438.37	68.90	376.87
50.81	608.20	49.66	497,73 <sup>4</sup>	24.50	469.34	40.92	438.35	70.90	377.23
51.81	608.55	50.22	498.41	33.25	471.27	41.92	438.35	71.90	377.68
52.81	609,14 <sup>4</sup>	53.02	499.63	42.86	476.90	43.92	438.49	72.90	377.68
55.39	610.01	54.86	500.63	46.07	478.44	44.92	438.50	73.90	378.05
55.94	610.91	67.45	503.52			45.92	438.68	74.90	378.16
57.44	611.34					46.92	438.87	76.20	378,63 <sup>4</sup>
74.84	615.28					47.92	439,28 <sup>4</sup>	77.07	379.40
						51.22	442.20	81.29	380.50
						55.69	442.27	83.99	382.66
								86.59	383.02
								92.33	384.45
								101.01	384.25
								113.82	384.85
								126.29	390.70

<sup>2</sup>: Seções determinadas em trabalho de campo deste estudo.

<sup>3</sup>: Distância a partir do marco de cada seção transversal, tomada da esquerda para a direita.

<sup>4</sup>: Nível da água.