



ANÁLISE DOS EFEITOS DE DESPEJOS ACIDENTAIS DE POLUENTES EM  
CORPOS HÍDRICOS USANDO TRAÇADORES FLUORESCENTES - ESTUDO DE  
CASO: BACIA DO RIO GUANDU / RJ

Jacqueline Zardo Giori

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 Paulo Soares de Azevedo  
José Otavio Goulart Peclly

Rio de Janeiro

Maio de 2011

ANÁLISE DOS EFEITOS DE DESPEJOS ACIDENTAIS DE POLUENTES EM  
CORPOS HÍDRICOS USANDO TRAÇADORES FLUORESCENTES - ESTUDO DE  
CASO: BACIA DO RIO GUANDU / RJ

Jacqueline Zardo Giori

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA  
(COPPE) 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.

---

José Otavio Goulart Pecly, D.Sc.

---

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

---

Prof.<sup>a</sup> Rosa Maria Formiga Johnsson, Docteur.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
MAIO DE 2011

Giori, Jacqueline Zardo

Análise dos Efeitos de Despejos Acidentais de Poluentes em Corpos Hídricos usando Traçadores Fluorescentes - Estudo do Caso: Bacia do rio Guandu/RJ / Jacqueline Zardo Giori. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XIV, 118 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: José Paulo Soares de Azevedo

José Otavio Goulart Pecky

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 98-108.

1. Acidentes Ambientais. 2. Transporte e dispersão de poluentes. 3. Traçadores fluorescentes em hidrologia. 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 aos meus pais, Jorge e Marta, pelo amor e confiança, a minha irmã Fabiana, a minha sobrinha Maria Eduarda, e a toda minha família, pelo apoio e incentivo em todos os momentos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por estar sempre comigo nos momentos mais difíceis, dando a mim saúde, sabedoria e força para concluir mais esta etapa.

Aos meus pais Jorge e Marta pelo incentivo dado aos meus estudos. Em especial a minha mãe, pelo apoio incondicional, tornando minha caminhada mais fácil. À minha irmã Fabiana e a minha sobrinha Maria Eduarda, pela ajuda e carinho.

A toda minha família, por me concederem tantas alegrias nessa fase importante da minha vida, confiando e acreditando no meu sucesso.

Ao meu orientador José Paulo Soares de Azevedo pela ajuda na escolha do tema deste trabalho.

Ao meu orientador Otavio Pecky pela confiança em mim depositada, pela dedicação, paciência, incentivo e por todo o conhecimento transmitido durante este trabalho.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

Ao Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABRHIMA)/Hidrologia da COPPE/UFRJ pelas informações fornecidas para a elaboração deste trabalho.

À Viviane Japiassú Viana pela disponibilidade de dados necessários para a elaboração dos mapas.

Ao Carlos Eduardo Strauch, chefe do Serviço de Operações em Emergências Ambientais – SOPEA/INEA, pela ajuda na obtenção de informações sobre os acidentes atendidos no transporte rodoviário no Estado do Rio de Janeiro.

Ao Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ pelos dados fornecidos dos ensaios de campo com traçadores fundamentais para esta dissertação. Ao professor João Roldão, pelos conhecimentos dado sobre traçadores, e a todos que fazem parte do laboratório, Renato, Henrique, Amauri e Neide.

Ao Lucas Laquini, uma pessoa muito especial que sempre esteve ao meu lado, mesmo a alguns quilômetros de distância, e que me deu incentivo, carinho, e momentos felizes quando mais precisei.

Aos meus colegas do mestrado, Júlia, Erika, Yasmim, William, Francesco, Monica e Felipe, que, em pouco tempo, tornaram-se verdadeiros amigos, e que me

deram força nos momentos de desespero, suprindo em muitas vezes a distância da família.

Aos meus amigos desde os tempos da graduação, Carol, Vinicius e Lilian que estão presente até hoje. Ao Diego, sempre paciente e disposto a elucidar minhas dúvidas e. a todos que, de alguma forma, me ajudaram neste trabalho. Muito obrigada.

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

ANÁLISE DOS EFEITOS DE DESPEJOS ACIDENTAIS DE POLUENTES EM  
CORPOS HÍDRICOS USANDO TRAÇADORES FLUORESCENTES - ESTUDO DE  
CASO: BACIA DO RIO GUANDU / RJ

Jacqueline Zardo Giori

Maio/2011

Orientadores: José Paulo Soares de Azevedo

José Otavio Goulart Pecky

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho aborda o problema de despejo acidental de poluentes e sua propagação em cursos d'água como consequência de acidentes durante o transporte rodoviário de produtos perigosos. Um modelo matemático de previsão que permite estimar a concentração do poluente no espaço e no tempo foi utilizado. O estudo foi desenvolvido visando a tomada de decisões gerenciais com relação à captação de água pelos usuários compreendidos entre a estação elevatória de Santa Cecília, na bacia do rio Paraíba do Sul, e a montante da captação da Estação de Tratamento de Água do Guandu, situada na Bacia do rio Guandu. Os dados relativos às características de transporte e dispersão foram obtidos a partir de ensaios *in situ* com o uso de traçadores fluorescentes disponibilizados pelo Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ. Os resultados do estudo indicaram, através das simulações de cenários, os tempos de trânsito de um poluente conservativo nas seções de captação selecionadas na área de estudo, auxiliando nas medidas emergenciais a serem tomadas em caso de acidentes nesse trecho. Outra contribuição importante deste trabalho foi a estimativa do local de um acidente e a distribuição temporal de massa do poluente lançada a partir de uma curva de passagem observada por uma estação de monitoramento de qualidade da água.

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

ANALYSIS OF EFFECTS FROM ACCIDENTAL POLLUTANT SPILL IN WATER RESOURCES USING FLUORECENT TRACERS. CASE STUDY: GUANDU RIVER BASIN / RJ.

Jacqueline Zardo Giori

May/2011

Advisors: José Paulo Soares de Azevedo  
José Otavio Goulart Pecly

Department: Civil Engineering

This paper approaches the problem of accidental discharge of pollutants and their spread into waterways as a consequence of inroad transport of dangerous products. A mathematical model of prediction that allows the estimation of the pollutant concentration in space and time was used. The study was developed for the correct management decisions making related to the capture of water by users located between the pumping station of Santa Cecilia, in the basin of Paraíba do Sul river, and the upstream of capture of the Guandu Water Treatment Station, located on the basin of river Guandu. The data relating to the characteristics of transport and dispersion in the studied site were obtained from experiments in situ using fluorescent tracers available in the Tracer Laboratory (COPPE/UFRJ). The results of the study indicated, through simulations of scenarios with possible accidents, the time of travel of a conservative pollutant in selected sections in the study area, assisting in emergency measures to be adopted in the case of accidents on this section. It has also provided a tool that allows to estimate, from the breakthrough curve monitored by an automatic station, the possible place of the accident and the mass distribution of the pollutant released.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Objetivos .....	3
<b>2</b>	<b>TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS .....</b>	<b>5</b>
2.1	Apresentação .....	5
2.2	Características Gerais.....	7
2.3	Acidentes no Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos no Brasil e no Estado do Rio de Janeiro .....	10
2.4	Regulamentação do Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos .....	14
2.5	Atendimento Emergencial em Caso de Acidentes .....	17
<b>3</b>	<b>DISPERSÃO DE POLUENTES EM CURSOS D'ÁGUA .....</b>	<b>21</b>
3.1	Transporte Difusivo-Advectivo.....	21
3.2	Traçadores em Hidrologia.....	25
3.2.1	Aplicações de Traçadores.....	26
3.2.2	Técnica de Traçadores como Apoio a Sistemas de Emergência em Corpos Hídricos.....	27
3.2.3	Determinação do Coeficiente de Dispersão Longitudinal.....	29
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
4.1	Seleção da Área de Estudo .....	30
4.2	Sinais e Sistemas Lineares .....	31
4.2.1	Conceitos Fundamentais .....	31
4.2.2	Sinais Discretos no Tempo.....	32
4.2.3	Sistemas Lineares .....	33
4.2.4	Resposta Impulsional e Convolução .....	34
4.3	Utilização da Técnica de Traçadores .....	36
4.4	Modelo de Cálculo Utilizado .....	39
4.4.1	Aplicabilidade do Modelo.....	40
4.5	Dados Disponíveis e Simulações Propostas.....	41
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO: ASPECTOS HIDROLÓGICOS E DESPEJOS ACIDENTAIS DE POLUENTE NA BACIA DO RIO GUANDU.....</b>	<b>42</b>
5.1	A Bacia Hidrográfica do Rio Guandu .....	42
5.1.1	Características Gerais .....	42

5.1.2	Aspectos Climáticos .....	44
5.1.3	Uso e Ocupação Atual do Solo .....	44
5.1.4	Usos Múltiplos da Bacia .....	46
5.1.5	Transposição da Bacia do Rio Paraíba do Sul.....	46
5.2	Trecho Escolhido para Aplicação da Metodologia .....	50
5.2.1	Características Gerais .....	50
5.2.2	Hidrografia Considerada .....	54
5.2.3	Qualidade das Águas .....	56
5.2.4	Principais Usuários das Águas .....	58
5.2.5	Rodovias Inseridas na Área de Estudo .....	60
5.3	Cenários de Simulação .....	62
5.3.1	Pontos Críticos Considerados na Área de Estudo .....	62
5.3.2	Pontos de Captação .....	65
5.4	Uso de Traçadores na Obtenção de Parâmetros para o Modelo Matemático.....	66
5.4.1	Ensaio de Campo .....	66
5.4.2	Análise dos Resultados dos Ensaio de Campo .....	72
<b>6</b>	<b>CENÁRIOS DESENVOLVIDOS.....</b>	<b>74</b>
6.1	Cenário I.....	75
6.2	Cenário II.....	79
6.3	Cenário III .....	87
6.4	Análise dos Cenários .....	91
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>98</b>
	<b>APÊNDICE</b>	
	<b>ANEXO</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 (a) e (b) - Peixes mortos em decorrência de acidente ambiental com vazamento de Endosulfan no rio Pirapetinga em novembro de 2008. ....	7
Figura 2.2 - Disposição da identificação do produto perigoso transportado. ....	9
Figura 2.3- Percentual de acidentes registrados por tipologia no período de 2006 a 2009. ....	11
Figura 2.4 – Percentual de acidentes registrados por tipologia no período de 1983 a 2010 no estado do Rio de Janeiro. ....	12
Figura 2.5 - Número de acidentes rodoviários atendidos pelo SCPA/SOPEA. ....	12
Figura 2.6 – Diagrama esquemático das entidades envolvidas na elaboração das normas relativas a produtos perigosos. ....	17
Figura 2.7 - Etapas do atendimento emergencial rodoviário a veículos com produtos perigosos. ....	20
Figura 4.1 - Diagrama simplificado de um sistema. ....	31
Figura 4.2 - Representação gráfica de um sinal discreto no tempo. ....	32
Figura 4.3 - Representação de um sistema discreto no tempo. ....	33
Figura 4.4 – Representação esquemática de um sistema. ....	34
Figura 4.5 - Exemplo de aplicação da técnica de convolução. ....	35
Figura 4.6 – Representação esquemática da superposição das curvas de resposta do traçador a partir de injeções instantâneas. ....	37
Figura 4.7 - Representação esquemática do processo de mistura em rios e da distância de boa mistura. ....	40
Figura 5.1 - Esquema representativo do sistema de transposição das águas da bacia do rio Paraíba do Sul para a bacia do rio Guandu. ....	48
Figura 5.2 - Representação esquemática do sistema hidráulico Paraíba do Sul e localização dos principais usuários de água na bacia do rio Guandu. ....	49
Figura 5.3 – Localização da área considerada no estudo. ....	53
Figura 5.4 – Rodovias inseridas na área de estudo. ....	61
Figura 5.5 - Pontos críticos de lançamento. ....	64
Figura 5.6 - Localização das seções de monitoramento de traçador na primeira campanha. ....	68

Figura 5.7 – Localização das seções de monitoramento de traçador na segunda campanha.....	71
Figura 6.1 - Curvas de passagem do poluente nas seções de monitoramento em todo o trecho. ....	76
Figura 6.2 - Curvas de passagem de traçador nas seções SC-229 A e VG-610 A. ....	77
Figura 6.3 - Curvas de passagem de traçador nas seções VG-370, VG-370 A, LG-350 A, LG-351, LG-352, GN-201, GN-202 e GN-200. ....	78
Figura 6.4 - Representação da distribuição da massa em função do tempo. ....	80
Figura 6.5 - Histograma das vazões mensais máximas, médias e mínimas no período de 2005 a 2010. ....	81
Figura 6.6 - Curva de passagem para todas as vazões nas diferentes distâncias. ....	82
Figura 6.7 - Curvas de passagem para a situação de vazão mínima (120 m <sup>3</sup> /s) nas diferentes seções de captação (Usina Termelétrica de Paracambi – 12,8 km; Duke Energy Brasil – 18,2 km; Eletrobolt – 35 km; ETA Guandu – 45,1 km). ....	83
Figura 6.8 - Curva de passagem para a situação de vazão média (160 m <sup>3</sup> /s) nas diferentes seções de captação (Usina Termelétrica de Paracambi – 12,8 km; Duke Energy Brasil – 18,2 km; Eletrobolt – 35 km; ETA Guandu – 45,1 km). ....	83
Figura 6.9 - Curva de passagem para a situação de vazão máxima (240 m <sup>3</sup> /s) nas diferentes seções de captação (Usina Termelétrica de Paracambi – 12,8 km; Duke Energy Brasil – 18,2 km; Eletrobolt – 35 km; ETA Guandu – 45,1 km). ....	84
Figura 6.10 – Comparação da curva de passagem apresentada no trabalho de COSTA e ARAUJO (1980) com curva simulada nesse trabalho. ....	86
Figura 6.11 – Curva observada na estação de monitoramento de qualidade de água para um possível acidente simulado. ....	88
Figura 6.12 – Curva de passagem do traçador na ETA Guandu. ....	89
Figura 6.13 – Distribuição de massa do poluente derramado no corpo hídrico a uma distância de 23,5 km a montante da seção de controle. ....	90

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 - Principais Afluentes do Rio Guandu .....	43
Tabela 5.2 – Vegetação e o uso do solo na Região Hidrográfica do Guandu. ....	45
Tabela 5.3– Principais tipos de uso e vazão de captação correspondente. ....	46
Tabela 5.4 - Informações demográficas sobre os municípios pertencentes a região de estudo.....	51
Tabela 5.5 - Média dos parâmetros monitorados pelo INEA na bacia do rio Guandu para o período de 2006 a 2007. ....	56
Tabela 5.6 - Demandas de água cadastradas na Bacia do Rio Guandu. ....	59
Tabela 5.7- Usinas hidrelétricas situadas no trecho selecionado.....	59
Tabela 5.8 – Rodovias consideradas na área de estudo. ....	60
Tabela 5.9 - Distâncias dos possíveis locais de despejo acidental em relação a S0. ....	65
Tabela 5.10 - Distâncias de possíveis locais de captação em relação a S0. ....	66
Tabela 5.11 - Distâncias entre as seções de injeção e monitoramento. ....	67
Tabela 5.12 - Dados relativos a injeção do traçador.....	69
Tabela 5.13 - Distâncias entre as seções de injeção e monitoramento. ....	70
Tabela 5.14 - Dados das injeções de traçador fluorescente nos ensaios no rio Guandu. ....	72
Tabela 5.15 – Síntese dos resultados obtidos na segunda campanha de campo com traçadores.....	72
Tabela 6.1 - Síntese dos resultados obtidos no ensaio com traçadores. ....	75
Tabela 6.2 – Resultados da simulação do cenário de massa unitária nas seções monitoradas em todo o trecho. ....	79
Tabela 6.3 - Resultado do cenário simulado.....	84
Tabela 6.4 – Síntese dos resultados apresentados por COSTA e ARAUJO (1980).....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT	Agencia Nacional de Transportes Terrestres
CEDAE	Companhia de Águas e Esgotos
CERHI	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONTRAN	Conselho Nacional de Transito
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ETA	Estação de Tratamento de Água
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
NBR	Norma Brasileira
RMRJ	Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro
RTQ	Regulamentos Técnicos da Qualidade
RTPP	Regulamento Nacional de Transporte de Produtos Perigos
SCPA	Serviço de Controle da Poluição Acidental
SEMADS	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SOPEA	Serviço de Operações em Emergências Ambientais
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

A água é um recurso cada vez mais escasso, seja pelo aumento da demanda devido ao crescimento populacional ou pela redução da oferta, especialmente pela poluição dos mananciais. Os riscos ambientais e de saúde associados a uma possível escassez de água são inúmeros e por isso tornou-se crescente a busca de novas fontes de abastecimento e medidas de controle da poluição. Nesse sentido, o gerenciamento dos recursos hídricos tem como objetivo principal garantir o suprimento de água em quantidade suficiente e qualidade satisfatória.

Como forma de corroborar essa necessidade de atendimento suficiente e satisfatório, tem-se a Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei nº 9.433/97 (BRASIL, 1997), que traz definições importantes no setor de recursos hídricos permitindo um melhor gerenciamento da água e atuando na tentativa de minimizar os impactos da escassez. Enquanto isso, como tentativa de controle da poluição tem-se a resolução CONAMA 357/05, que além de enquadrar os corpos d'água determina padrões de lançamento.

O lançamento de uma massa poluidora em corpos hídricos, independente de sua origem, compromete a qualidade das águas, resultando em prejuízos ao meio ambiente aquático, ao abastecimento da população, da agricultura e das indústrias. Entretanto, de acordo com GUSMÃO (2002), tão importante quanto o controle das fontes contínuas de poluição é o controle de fontes eventuais, devido aos grandes danos ambientais que estas podem causar. Assim, destaca-se a poluição gerada por acidentes envolvendo o transporte terrestre de produtos perigosos, já que os acidentes têm crescido continuamente. Por exemplo, no Estado do Rio de Janeiro, a atividade de transporte rodoviário de produtos perigosos foi responsável por aproximadamente 38% dos atendimentos a emergências realizados pelo Serviço de Operações em Emergências Ambientais (SOPEA) nos últimos anos (INEA, 2011).

Nesse contexto, o transporte rodoviário de produtos perigosos tem apresentado destaque em estudos relacionados aos impactos ambientais gerados por essa atividade, uma vez que não é possível prever exatamente onde será o ponto de lançamento das

substâncias poluidoras antes do acidente acontecer, o que atribui uma maior dificuldade ao gerenciamento dos riscos.

Entender o comportamento de qualquer constituinte lançado no corpo hídrico exige a compreensão da hidrodinâmica do corpo receptor, já que conhecer previamente as características hidrológicas de um rio permite a adoção de medidas emergenciais em menor tempo, em caso de acidentes e aumenta a possibilidade de sucesso em tais circunstâncias (AMARAL, 2009). Do mesmo modo, informações como a capacidade de transporte e dispersão de poluentes solúveis em cursos de águas naturais são importantes no planejamento preventivo de medidas que visam minimizar prejuízos à saúde pública e às atividades econômicas (BOYD, 2000; RIBEIRO, 2007).

Nesse sentido, a utilização de modelos numéricos na previsão de diversas situações envolvendo os recursos hídricos constitui-se como uma ferramenta de apoio, visando auxiliar no planejamento, operação e gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que possibilitam a realização de estudos do comportamento dos corpos d'água. Como exemplo, pode-se citar os modelos matemáticos de qualidade de água e transporte de poluentes, que consistem em prever a movimentação dos poluentes ao longo de um rio, permitindo estimar variações temporais e espaciais de sua concentração. Propiciando assim, antever e avaliar, para diferentes cenários, as alterações na qualidade das águas de um efetivo e/ou passível corpo receptor de descargas de poluentes e contaminantes (JAMES, 1984; BÜGE, 1990; SCHNOOR, 1996; LIMA e GIORGETTI, 1997).

Contudo, a validação ou utilização confiável desses modelos matemáticos, segundo RIGO (1992), vai além de uma aproximação puramente teórica, deve levar em consideração estudos *in situ* que procuram determinar as características de cada corpo hídrico, como por exemplo, a complexidade e diversidade dos escoamentos naturais, evitando as imprecisões decorrentes do uso de fórmulas empíricas.

Este trabalho baseia-se no uso da técnica de traçadores artificiais para determinação dos parâmetros de transporte e dispersão de substâncias em escoamentos naturais. Tal método é utilizado para verificar o comportamento hidrodinâmico de um determinado processo físico e químico num curso d'água utilizando, como recurso, a injeção de uma substância conservativa no seu escoamento (BEHRENS, 2001; LIEBUNDGUT *et al.*, 2009). Essa técnica apresenta diversas aplicações em hidrologia, dentre elas a determinação dos parâmetros de transporte e dispersão em rios, visando

auxiliar na determinação de medidas necessárias que possam minimizar problemas ocasionados por despejos acidentais de poluentes.

O presente trabalho pretende contribuir com os estudos sobre a previsão da dispersão de poluentes, derramados nos acidentes em rodovias, como um instrumento de previsão de tempo de chegada e de concentração na captação de água dos usuários compreendidos entre a estação elevatória de Santa Cecília, localizada na bacia do rio Paraíba do Sul, e a montante da captação da Estação de Tratamento de Água (ETA) do Guandu, situada na bacia do rio Guandu. Tal escolha deve-se ao fato que este trecho constitui parte da área de influência da captação da ETA Guandu, a qual é responsável pelo abastecimento de cerca de 85% da população da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

Desse modo, acidentes com produtos perigosos neste trecho além de afetar o abastecimento de água dos usuários ali instalados, compromete os usuários da RMRJ abastecida pela ETA Guandu. Para simular acidentes nesse trecho será utilizado um modelo matemático de previsão que permite estimar a concentração do poluente no espaço e no tempo, conhecido como modelo de Taylor, no entanto, será utilizada a técnica de convolução que permitirá ao modelo simular o lançamento do poluente de forma contínua no corpo hídrico.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo estimar a variação da concentração de substâncias despejadas acidentalmente num sistema fluvial ao longo do tempo em seções de interesse.

O sistema fluvial escolhido, para aplicar a metodologia proposta, compreende um trecho com aproximadamente 80 km, situado entre a estação elevatória de Santa Cecília, localizada na Bacia do rio Paraíba do Sul, e a montante da captação da ETA Guandu, situada na Bacia do rio Guandu, ou seja, parte do Sistema Guandu. Para que se torne possível alcançar o objetivo geral deste trabalho, se faz necessário os seguintes objetivos específicos listados a seguir:

- Identificar os principais pontos críticos das rodovias localizadas na área de estudo, bem como os pontos de captação considerados;

- Descrever a técnica para determinação das características de transporte e dispersão de poluentes em rios usando traçadores fluorescentes;
- Utilizar o modelo de previsão da dispersão de poluentes, considerando, no entanto, o lançamento contínuo no corpo hídrico;
- Fornecer um instrumento de previsão de tempo de chegada da pluma de poluentes e de sua concentração na captação de água dos usuários;
- Construir cenários de acidentes e simular a curva de passagem de poluentes para seções de captação.

### **Estrutura da Dissertação**

O presente estudo é constituído por sete capítulos. No Capítulo 1 encontra-se a introdução da dissertação contendo a motivação para o tema escolhido, são descritos ainda os objetivos que levaram ao desenvolvimento deste estudo.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o transporte rodoviário de produtos perigosos no Brasil, incluindo os acidentes, as medidas emergenciais a serem tomadas e a legislação referente a esta atividade. No Capítulo 3 são descritos os conceitos fundamentais empregados nessa dissertação, como a equação da advecção-difusão unidimensional e a utilização de traçadores artificiais para determinar os parâmetros de transporte e dispersão de poluentes em corpos hídricos.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia desenvolvida no presente estudo, utilizada para determinar as curvas de passagem de um poluente lançado de modo instantâneo e contínuo no trecho considerado, como consequência de um acidente rodoviário, permitindo a análise do comportamento desse poluente aos principais usuários considerados da área de estudo.

No capítulo 5 é apresentado o estudo de caso deste trabalho. Onde foi caracterizado o trecho de curso d'água escolhido para a aplicação da metodologia, o qual está situado entre a estação Elevatória de Santa Cecília, na bacia no rio Paraíba do sul, e a ETA Guandu, na bacia do rio Guandu. Foram ainda descrita a hidrografia considerada, as principais rodovias inseridas na área de estudo, os principais pontos críticos de acidentes e os pontos de captação ao longo do trecho. Ainda é descrito neste capítulo a bacia hidrográfica do rio Guandu, visto que o trecho a ser analisado encontra-

se em sua maior parte nesta bacia, apresentando assim, os aspectos climáticos, uso e ocupação do solo, usos múltiplos da água, entre outros.

O capítulo 6 descreve os cenários simulados, apresentando os resultados obtidos a partir das simulações para os cenários propostos. Já no capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões obtidas no presente trabalho.

## **2 TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS**

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre o transporte rodoviário de produtos perigosos, destacando suas características gerais, a legislação e os órgãos que fazem parte desta atividade, as estatísticas dos acidentes, entre outros aspectos.

### **2.1 Apresentação**

O transporte de cargas nas rodovias brasileiras tem apresentado um crescimento importante decorrente do aumento da demanda, do crescimento econômico e industrial e devido, sobretudo, a um mercado consumidor mais aberto, competitivo e globalizado (REAL, 2000). Nesse sentido, aproximadamente 70% do transporte de produtos considerados perigosos são realizados por rodovias, quando comparado com as demais modalidades (ferroviário e aquaviário) (NARDOCCI e LEAL, 2006). Contudo, esse crescimento traz consigo, além de todo o desenvolvimento econômico, o aumento da ocorrência de acidentes nas instalações industriais e no transporte de substâncias perigosas.

Nesse contexto, os riscos envolvidos no transporte rodoviário desses produtos são grandes e, segundo NARDOCCI e LEAL (2006), estão diretamente relacionados às propriedades das substâncias envolvidas, à qualidade da malha viária, à presença de áreas densamente povoadas no entorno, à presença de pedestres na via, entre outros, gerando consequências indesejáveis.

Exemplos desses riscos que se tornaram realidade são: o acidente ocorrido na BR-116, km 224, sentido RJ/SP no dia 11/05/2008, onde uma carreta tanque

transportando 35.000 litros de álcool anidro tombou e resultou no vazamento de 20.000 litros do produto. Nesse acidente, devido à declividade do terreno, não foi possível conter o produto e o mesmo atingiu solo, mata e rede de águas pluviais. Outro exemplo foi o acidente no município de Miguel Pereira, no Rio de Janeiro, no dia 09/11/2010 na Rodovia RJ-125, km 34, onde um caminhão que transportava 15.000 litros de combustível, divididos em três compartimentos de 5000 litros, de álcool, gasolina e diesel, capotou e resultou no vazamento total dos produtos para o rio Santana afluente do rio Guandu. Como consequência houve a contaminação direta das águas do rio Santana e possibilidade de pequena contaminação do rio Guandu (INEA, 2011).

Outros fatores podem contribuir para a liberação de substâncias perigosas no meio ambiente, como falhas nos sistemas das indústrias, mau dimensionamento, pequenos incidentes nas instalações industriais, entre outros. Desse modo, podemos citar o acidente ocorrido no dia 25/07/2010, provocado por um furo em um mineroduto, da empresa Samarco, o que resultou no vazamento de minério de ferro no rio São Sebastião, em Minas Gerais, que abastece a cidade. A operação do mineroduto foi suspensa pela Samarco, e a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) teve que interromper a captação de água do rio São Sebastião (Portal G1, 2010).

Outro exemplo foi o acidente ocorrido em novembro de 2008 em Resende, município do Estado do Rio de Janeiro, onde cerca de 8 mil litros do pesticida organoclorado endosulfan vazaram da empresa Servatis para o rio Pirapetinga atingindo o rio Paraíba do Sul, o que resultou na interrupção da transposição das águas do rio Paraíba do Sul para o Guandu, e na interrupção do abastecimento de água de várias cidades ao longo do rio Paraíba do Sul. O vazamento do pesticida ocorreu por causa da falha no descarregamento, e a contaminação resultou, como apresentado na Figura 2.1, na morte da biota aquática (IBAMA, 2010).



Fonte: IBAMA (2010)

Figura 2.1 (a) e (b) - Peixes mortos em decorrência de acidente ambiental com vazamento de Endosulfan no rio Pirapetinga em novembro de 2008.

Assim, observa-se que os danos ambientais podem se restringir a um determinado lugar ou ganhar maiores proporções, alcançando locais mais distantes daquele onde ocorreu o acidente, pois, ao atingir um curso de água pode ocasionar poluição dos rios de uma dada região. No entanto, o corpo hídrico pode ser atingido em diferentes pontos por uma substância poluidora, seja por lançamentos de efluentes sem tratamento, ou por despejos acidentais em rodovias, comprometendo assim a qualidade da água, resultando em prejuízos ao abastecimento da população, dos agricultores, das indústrias, entre outros.

É importante salientar que o transporte rodoviário, de acordo com AMARAL (2009), constitui uma fonte potencial de poluição, pois no caso de um acidente envolvendo uma carga de produtos perigosos, esses produtos podem ser despejados em grande quantidade e em um curto espaço de tempo no ambiente. Este trabalho tem como foco, o despejo acidental de poluentes durante o transporte rodoviário e suas conseqüências caso a substância atinja um corpo hídrico, visando a contribuição no gerenciamento dessa atividade.

## 2.2 Características Gerais

Os acidentes com transporte rodoviário de produtos perigosos têm sido motivo de preocupação devido aos problemas que podem causar à população com respeito à segurança e à saúde e, sobretudo ao meio ambiente, devido à vulnerabilidade ambiental de áreas, tais como os cursos d'água, uso da terra e possibilidade de impactos pela

infiltração de produtos perigosos no solo causando a poluição dos mananciais subterrâneos (PEDRO, 2006).

Segundo STRAUCH (2004), o transporte de produtos perigosos faz parte de uma das etapas da logística do processo produtivo, que pode ser caracterizada como um ciclo que abrange produção, transporte, armazenamento e consumo. Desse modo, possibilita que a produção receba matéria-prima e que os produtos sejam estocados e distribuídos, constituindo assim uma fase fundamental no processo produtivo.

De acordo com a Resolução ANTT nº 420/04, é denominado produto perigoso, para fins de transporte, *toda substância ou artigo encontrado na natureza ou produzido por qualquer processo que, por suas características físico-químicas, represente risco para a saúde das pessoas, para segurança pública ou para o meio ambiente.*

A cada etapa do processo produtivo, desde a produção até o consumo, existe a probabilidade de ocorrência de acidentes. No entanto, as operações de transporte são as mais vulneráveis, uma vez que estão expostas a uma infinidade de fatores externos que podem desencadear acidentes desde o ponto de origem até o destino final da carga (SCHENINI, 2006).

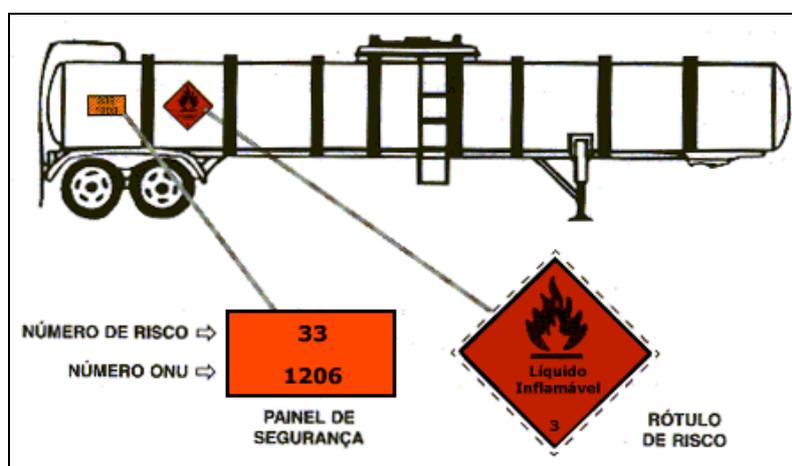
Outro fator que contribui para o aumento do risco no transporte de produtos perigosos é o fato de esta atividade ocorrer fora das instalações industriais, ou seja, em locais públicos e com livre acesso. Assim, caso ocorra um acidente durante o transporte envolvendo produtos perigosos, este possui características tanto de acidentes de tráfego, trabalho ou químico, mas sobretudo trata-se de um acidente ambiental quando solo, ar e água são contaminados pelas substâncias envolvidas no acidente (STRAUCH, 2004; VIANA, 2009).

Nesse contexto, todas as cargas são merecedoras de cuidados quando estão sendo transportadas. Entretanto os produtos químicos requerem maior atenção e, de acordo com os riscos que eles oferecem ao meio ambiente e à população são distribuídos em nove classes, sendo elas: classe 1 – explosivos; classe 2 – gases; classe 3 – líquidos inflamáveis; classe 4 – sólidos inflamáveis; classe 5 – substâncias oxidantes, peróxidos orgânicos; classe 6 – substâncias tóxicas, substâncias infectantes; classe 7 – materiais radioativos; classe 8 – substâncias corrosivas; classe 9 – substâncias perigosas diversas.

Além disso, o risco associado aos produtos químicos também está relacionado com o seu estado físico e suas quantidades, e podem gerar grandes consequências caso sejam despejados acidentalmente. Assim, cerca de 2.000 produtos são classificados

como perigosos distribuídos por todas as classes listadas, conforme o tipo de dano que podem provocar.

Como medida básica, visando alertar aos demais usuários da via, o transporte de produtos perigosos deve ser devidamente identificado em função do tipo de substância que está sendo transportada. Nesse sentido, as unidades de carga e de transporte contendo produtos perigosos devem ser sinalizadas com painéis de segurança e rótulos de risco, para tornar tais produtos facilmente reconhecidos à distância pela aparência geral dos símbolos (como forma e cor), para permitir a identificação rápida dos riscos que apresentam, e para prover por meio das cores dos rótulos, uma primeira indicação quanto aos cuidados ao observar no manuseio do produto. A Figura 2.2 ilustra um exemplo da disposição da identificação do produto perigoso transportado.



Fonte: ANTT.

Figura 2.2 - Disposição da identificação do produto perigoso transportado.

Como ilustrado na Figura 2.2, o painel de segurança contém o “*número da ONU<sup>1</sup>*”, composto de quatro algarismos, que permite que o produto perigoso seja identificado e que sejam facilmente obtidas informações físico-químicas de interesse ao atendimento de emergências, e o “*número de risco*” do produto transportado que, indica a intensidade do risco oferecido pelo produto.

Dessa forma, estas medidas de segurança permitem que possam ser identificados os produtos que estão sendo transportados nas rodovias, e caso haja um acidente, auxiliam os órgãos envolvidos no atendimento emergencial na tomada de

<sup>1</sup> ONU representa Organização das Nações Unidas.

decisões de maneira rápida visando diminuir os riscos ambientais que tais substâncias possuem.

### **2.3 Acidentes no Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos no Brasil e no Estado do Rio de Janeiro**

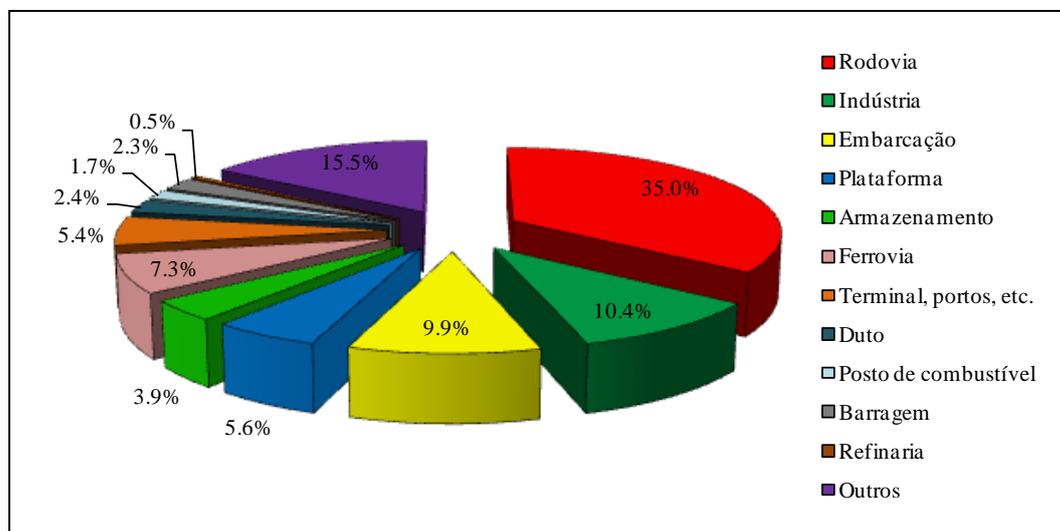
Os acidentes ambientais são caracterizados, de acordo com IBAMA (2009), como eventos inesperados e indesejados que podem causar, direta ou indiretamente, danos ao meio ambiente e à saúde. Contudo, esses eventos têm se mostrado amplamente distribuídos no território brasileiro, sendo, na maioria das vezes, associados ao transporte, principalmente terrestre, de substâncias perigosas.

Associado ao avanço da indústria química, outros fatores como, por exemplo, as más condições de conservação das vias públicas, a manutenção inadequada dos veículos, entre outros, tornam esta atividade potencialmente geradora de acidentes ambientais e coloca um grande número de pessoas expostas aos riscos de acidentes (FERREIRA 2003; SCHENINI *et al.* 2006).

No Brasil, o risco real desse tipo de acidente e a consequente busca de estratégias preventivas são dificultados pela baixa qualidade de dados estatísticos provenientes do cadastro de acidentes no transporte rodoviário de produtos perigosos. Os registros detalhados desses acidentes constituem a base de dados para o conhecimento das vias e trechos críticos no que se refere ao risco ambiental.

Visando fornecer informações mais detalhadas de ocorrências de acidentes, o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), órgão ligado ao Ministério do Meio Ambiente, implementou no final de 2005 um procedimento padronizado de comunicação de acidentes, com objetivo de auxiliar na definição de estratégias, procedimentos e ações prioritárias, por meio de dois formulários: Comunicado de Acidente Ambiental - Informações Preliminares e Comunicado de Acidente Ambiental - Informações Complementares. A partir das informações retiradas desses formulários, o IBAMA já realizou estudos acerca dos acidentes ambientais comunicados entre os anos de 2006 a 2009 (IBAMA, 2008, 2009 e 2010). Esses relatórios permitiram traçar o perfil dos acidentes ambientais registrados pelo órgão em todo o país nesse período, a fim de estabelecer estratégias de prevenção, bem como melhorar a capacidade de resposta a esses eventos, minimizando as possíveis consequências.

Entre os dados analisados, as rodovias foram os locais onde ocorreram mais acidentes no país, correspondendo a 35% dos acidentes atendidos pelo IBAMA entre os anos de 2006 a 2009, como pode ser observado na Figura 2.3.



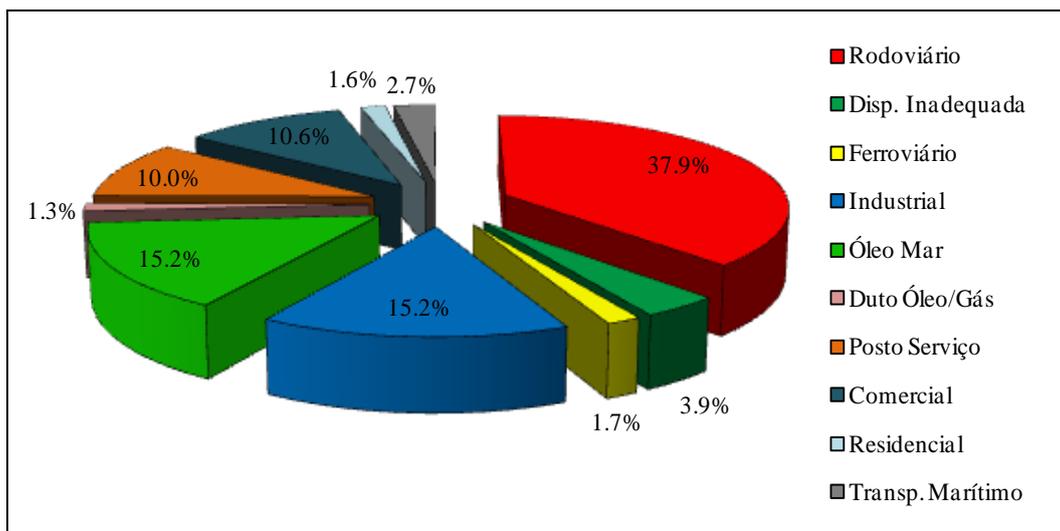
Fonte: Adaptado de IBAMA.

Figura 2.3– Percentual de acidentes registrados por tipologia no período de 2006 a 2009.

Além disso, a pesquisa aponta o sudeste como região de maior ocorrência de acidentes, sendo São Paulo e Minas Gerais os estados com a maior incidência dos acidentes comunicados nos quatro anos de monitoramento. Observou-se, ainda, que os rios e córregos foram os locais mais afetados pelos acidentes registrados no período da pesquisa.

No Estado do Rio de Janeiro, o atendimento a emergências ambientais iniciou-se em 1983 com a criação do órgão ambiental do estado, na época Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA) atualmente Instituto Estadual do Ambiente (INEA), do Serviço de Controle da Poluição Acidental (SCPA), hoje Serviço de Operações em Emergências Ambientais (SOPEA), responsável pela análise e operação de planos de emergência dos acidentes atendidos no Estado do Rio de Janeiro.

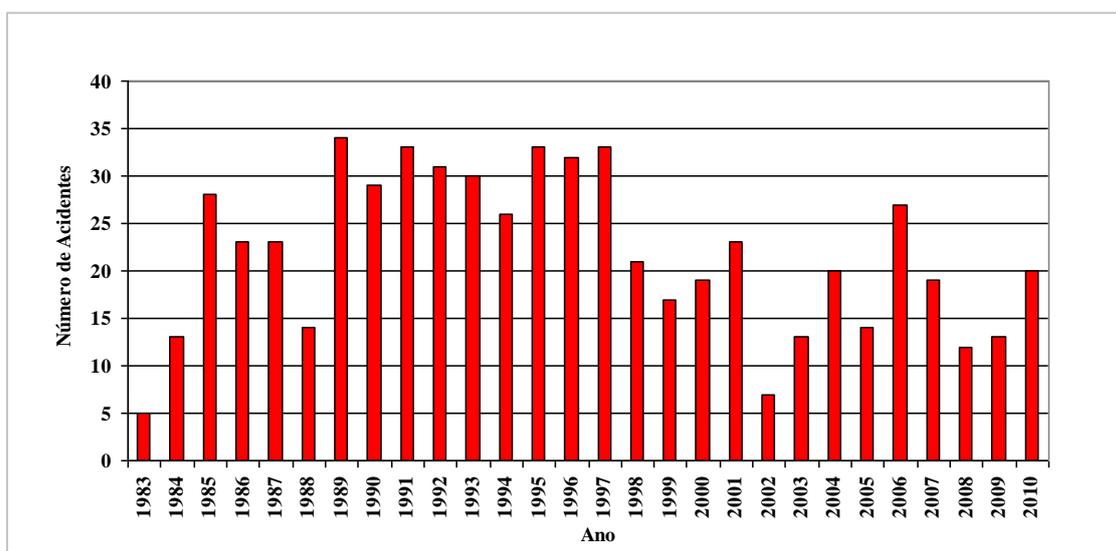
Dados coletados junto ao SOPEA/INEA mostram que os acidentes rodoviários representaram cerca de 38% do total de acidentes atendidos no Estado do Rio de Janeiro no período de 1983 a 2010. A Figura 2.4 apresenta a distribuição dos atendimentos a emergências por tipologia dos acidentes atendidos no Estado do Rio de Janeiro.



Fonte: SOPEA/INEA (2011)

Figura 2.4 – Percentual de acidentes registrados por tipologia no período de 1983 a 2010 no estado do Rio de Janeiro.

É possível verificar na Figura 2.4 que o atendimento aos acidentes no transporte rodoviário predominou no período analisado representando 38% do total, seguido dos acidentes industriais e derramamento de óleo no mar, correspondendo aproximadamente a 15% cada. A distribuição anual dos acidentes rodoviários está representada na Figura 2.5.



Fonte: SOPEA/INEA (2011).

Figura 2.5 - Número de acidentes rodoviários atendidos pelo SCPA/SOPEA.

A partir desses dados observa-se a importância de estudos relacionados aos impactos provocados por acidentes envolvendo o transporte de substâncias perigosas. Esses acidentes representam riscos para a saúde da população, para a segurança pública e para o meio ambiente. Desta forma, diante dos riscos ambientais e aos impactos gerados por um despejo acidental de poluentes em decorrência de acidentes em rodovias, diversos estudos relacionados ao tema vêm sendo realizados.

Nesse contexto, uma metodologia para prever o movimento dos poluentes provenientes de acidentes no transporte ferroviário, rodoviário e instalações industriais foi apresentada por WILSON *et al.* (1995), permitindo o fechamento dos pontos de captação à jusante do lançamento do poluente em sete principais rios utilizados para abastecimento de água potável em Yorkshire, Inglaterra. Para isso foi utilizada a técnica de traçadores como um substituto para um incidente de poluição, sendo possível descrever a pluma poluente com melhor precisão comparável a outros métodos.

Do mesmo modo, com o objetivo de contribuir para a melhoria da qualidade de resposta ao atendimento emergencial de tal atividade, STRAUCH (2004) realizou um levantamento e análise dos dados referentes aos acidentes no transporte rodoviário de produtos perigosos na malha rodoviária do estado do Rio de Janeiro, o que possibilitou identificar medidas tanto preventivas como corretivas, as quais deveriam ser implementadas em caso de acidentes.

VIANA (2009) identificou os riscos de acidentes ambientais associados ao transporte terrestre de produtos perigosos em parte da área de influência da Estação de Tratamento de Água do Guandu. Foram ainda mapeados os pontos de alta e média gravidade das principais rodovias e ferrovias situadas na área de estudo que podem comprometer a qualidade de água dos rios Paraíba do Sul e Guandu, caso haja algum acidente.

AMARAL (2009) propôs uma metodologia para estimar a concentração de substâncias poluidoras no rio Paraíba do Sul, entre Volta Redonda e Barra do Piraí, após despejos acidentais de poluentes provenientes dos acidentes em rodovias, visando à obtenção de informações para o planejamento prévio de ações a serem tomadas pelos usuários da bacia após um acidente.

Assim, diante do exposto, torna-se fundamental que diferentes setores da sociedade atuem de forma a controlar e prevenir a poluição ambiental decorrente de tais acidentes.

## 2.4 Regulamentação do Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos

As exigências do desenvolvimento econômico impõem a movimentação de produtos perigosos pelos diversos modais de transporte, que se mostram fundamentais para a cadeia produtiva. No entanto, independente do modal adotado, a atividade do transporte de produtos perigosos envolve riscos, uma vez que existe a possibilidade de acidentes.

Nesse contexto, no Brasil, segundo STRAUCH (2004), devido as suas dimensões continentais, assim como a sua característica predominante de transporte no modal rodoviário, houve a necessidade da elaboração de normas e leis que viessem a regulamentar tal tipo de transporte, em função dos riscos potenciais que esta atividade pode gerar ao meio ambiente e à população. Desse modo, vários órgãos e entidades atuam em conjunto, na questão de regulamentação do transporte de produtos perigosos, conforme a atribuição de cada um deles.

A regulamentação brasileira de produtos perigosos tem origem nas recomendações das nações unidas para o transporte de produtos perigosos - ONU *Recommendations on the Transport of Dangerous Goods*, cujos objetivos são de uniformizar medidas de segurança entre diversos modos de transporte. Essas regulamentações são atualizadas periodicamente, devido à constante evolução tecnológica do setor, aliada à dinâmica de novas formulações e fabricação de produtos, buscando o aperfeiçoamento das práticas operacionais e a manutenção da coerência mediante os padrões e procedimentos internacionais. Essas normas são, ainda, baseadas nas propriedades físico-químicas e toxicológicas dos produtos transportados, visando estabelecer condições seguras de transporte, manuseio e armazenamento de tais produtos, protegendo o meio ambiente e a saúde da população (GUSMÃO, 2002; ARAÚJO, 2007).

Vale ressaltar que o transporte de produtos perigosos constitui-se numa das atividades que merece preocupação sob aspecto ambiental, tendo em vista o potencial de risco de acidentes e as graves conseqüências ambientais que essa atividade pode resultar. Uma série de leis regula as atividades potencialmente poluidoras, em que se destaca, por exemplo, o *princípio do poluidor-pagador*, através da lei 6.938/81, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, e que vem provocar profundas alterações na apuração das responsabilidades por danos ambientais, impondo-se ao agente poluidor a obrigação de recuperação e indenização pelos danos causados ao meio

ambiente. Assim como o *princípio da co-responsabilidade*, assentado na lei 9.605/98, conhecida como a lei dos Crimes Ambientais, regulamentada pelo Decreto 3.179/99, e que garantiu uma maior proteção ao meio ambiente, diante da criação de penalidades referentes às infrações ambientais (GUSMÃO, 2002 e STRAUCH, 2004).

No Brasil, a legislação referente ao transporte de produtos perigosos teve início em 1983, através do Decreto 88.821 e do Decreto Lei 2.063 (GUSMÃO, 2002). Posteriormente, foi promulgado o Decreto 96.044 de 18/05/1988 (BRASIL, 1988), que dispõe sobre o “Regulamento para Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos”. Esse decreto dispõe os deveres, obrigações e responsabilidades, durante todo o transporte, dos atores envolvidos, ou seja, fabricante, destinatário, importador, expedidor e transportador. Trata ainda os critérios de fiscalização, penalidades e infrações e suas respectivas competências. Do mesmo modo que, estabelece os procedimentos caso ocorra acidentes ou simplesmente de avaria.

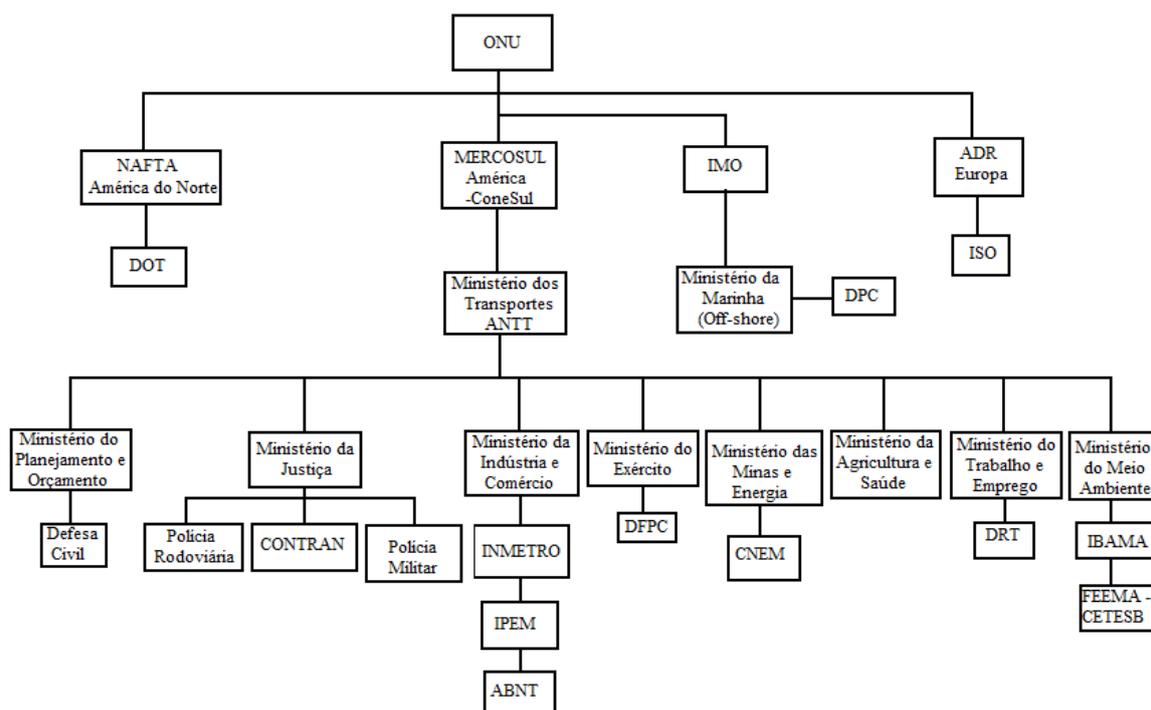
Visando, esclarecer e complementar o Decreto nº 96.044, a Resolução nº 420 de 12/02/04 (BRASIL, 2004), da Agência Nacional de Transportes Terrestres, estabelece as Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos. A qual normatiza as precauções mínimas que devem ser observadas para a prevenção bem como para a restrição dos efeitos de um acidente ou emergência (VERGINASSI, *et al.*, 2007). Além disso, substitui as portarias MT nº 261/89, nº 204/97, nº 409/97, nº 101/98, nº 402/98, nº 490/98, nº 342/00, nº 170/01 e nº 254/01 (portal Transporte de Produtos Perigosos, 2010).

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) é responsável por atestar a certificação e adequação dos veículos e equipamentos ao transporte de produto perigoso, bem como, realizar vistorias periódicas nos veículos e equipamentos (VERGINASSI, *et al.*, 2007 e VIANA, 2009). Dentre os regulamentos editados pelo INMETRO, podem ser destacados: Portaria Inmetro nº 326 de 11/12/2006, a qual aprova o Regulamento de Avaliação da Conformidade para Embalagens Utilizadas no Transporte Terrestre de Produtos Perigosos; a Portaria Inmetro nº 457 de 22/12/2008, que aprova o Regulamento Técnico da Qualidade 5 - Inspeção de Veículos Rodoviários Destinados ao Transporte de Produtos Perigosos; Portaria Inmetro nº 91 de 02/04/2009, que aprova a revisão dos Regulamentos Técnicos da Qualidade (RTQ) da área de produtos perigosos e do “Glossário de Terminologias Técnicas Utilizadas nos RTQ para o Transporte de Produtos Perigosos” (portal Transporte de Produtos Perigosos, 2010).

A normalização técnica no país é definida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a qual dispõe de normas específicas para o transporte terrestre de produtos perigosos. A ABNT estabelece na NBR-7500, a simbologia convencional para produtos perigosos, e os cuidados no manuseio, transporte e armazenamento de materiais de acordo com as cargas contidas. Na NBR-7501 são definidos termos empregados no transporte terrestre de produtos perigosos. Na NBR-7503 são especificados os requisitos e dimensões para a elaboração da ficha de emergência e do envelope de transporte terrestre de produtos perigosos. A NBR-9735 especifica a composição do conjunto de equipamento de proteção individual (EPI) a ser utilizado no transporte rodoviário de produtos perigosos. E a NBR-13221 especifica os requisitos para o transporte terrestre de resíduos.

O Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), vinculado ao Ministério da Justiça, é responsável pela regulamentação das questões relacionadas ao treinamento obrigatório dos motoristas, além de estabelecer critérios e valores das multas relativas às infrações previstas no Regulamento Nacional de Transporte de Produtos Perigosos (ARAÚJO, 2007). Entre estas resoluções, pode-se citar: Deliberação CONTRAN nº 50 de 29/06/2006, a qual dispõe sobre os códigos das infrações referentes ao Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos; Resolução CONTRAN nº 36 de 21/05/1998, que estabelece a forma de sinalização de advertência para veículos imobilizados, em situações de emergência; Resolução CONTRAN nº 91 de 04/05/1999, que dispõe sobre os cursos de treinamento específico e complementar para condutores de veículos rodoviários transportadores de Produtos Perigosos (portal Transporte de Produtos Perigosos, 2010).

Na Figura 2.6 são apresentados os órgãos responsáveis pela elaboração de leis, decretos, portarias, regulamentos técnicos, normas técnicas nacionais e internacionais, que envolvem a identificação, certificação de embalagem, transporte, manuseio, armazenagem, descarte e fiscalização de produtos perigosos.



Fonte: ARAÚJO (2007).

Figura 2.6 – Diagrama esquemático das entidades envolvidas na elaboração das normas relativas a produtos perigosos.

Esta seção apresentou algumas resoluções pertinentes ao transporte de produtos perigosos. No entanto, existem ainda uma série de leis, normas e especificações que regulam esta atividade.

## 2.5 Atendimento Emergencial em Caso de Acidentes

Diversas são as instituições que atuam no atendimento aos acidentes no transporte de produtos perigosos, uma vez que, estes podem ser caracterizados também como um acidente químico, de trabalho e de tráfego. Dentre essas instituições encontram-se os órgãos estaduais de meio ambiente, a Defesa Civil, o Corpo de Bombeiros, entre outras, as quais devem agir em conjunto e de forma organizada (IBAMA, 2008; VIANA, 2009). Contudo, pelo excessivo número e variedades de produtos existentes, o atendimento emergencial se constitui numa atividade extremamente diversificada (GUSMÃO, 2002).

De acordo com VIANA (2009), os riscos potenciais de tais acidentes são reduzidos caso o atendimento emergencial seja realizado de forma rápida e eficiente, no entanto, sendo necessário o bom preparo dos órgãos envolvidos nessas situações. O treinamento de equipes especializadas torna-se necessário visto que os acidentes e as condições de trabalho são adversos, mas os efeitos devem sempre ser controlados por meio de ações que os neutralizem, a fim de reduzir possíveis riscos (GUSMÃO, 2002).

A coordenação técnica do atendimento aos eventos que possam causar danos ambientais é função dos órgãos de controle ambiental e das equipes de emergências. O órgão de controle ambiental do estado do Rio de Janeiro, o INEA, através do Serviço de Controle da Poluição Acidental (SCPA), hoje Serviço de Operações em Emergências Ambientais (SOPEA), atua no atendimento aos acidentes ambientais envolvendo produtos perigosos, sendo responsável pela análise e operação de planos de emergência. Contudo, além de assistência técnica, o SOPEA é responsável pela fiscalização da movimentação de produtos químicos no estado, auxiliando os empreendedores e demais órgãos envolvidos na preparação do pronto atendimento às emergências ambientais (VIANA, 2009). Vale ressaltar, que o SOPEA atua conjuntamente com outros atores, como a Defesa Civil Estadual ou Municipal, Polícia Rodoviária Federal ou Estadual, Delegacia de Proteção ao Meio Ambiente, Corpo de Bombeiros e Polícia Militar (STRAUCH, 2004).

Já a coordenação operacional do atendimento cabe à Defesa Civil, sendo esta fundamental no atendimento a emergências. Ao Corpo de Bombeiros em conjunto com a Defesa Civil, de acordo com STRAUCH (2004), cabe realizar as ações preventivas necessárias para tal evento, como por exemplo, evacuar a área, extinguir o fogo, caso exista, e de salvar as vidas humanas.

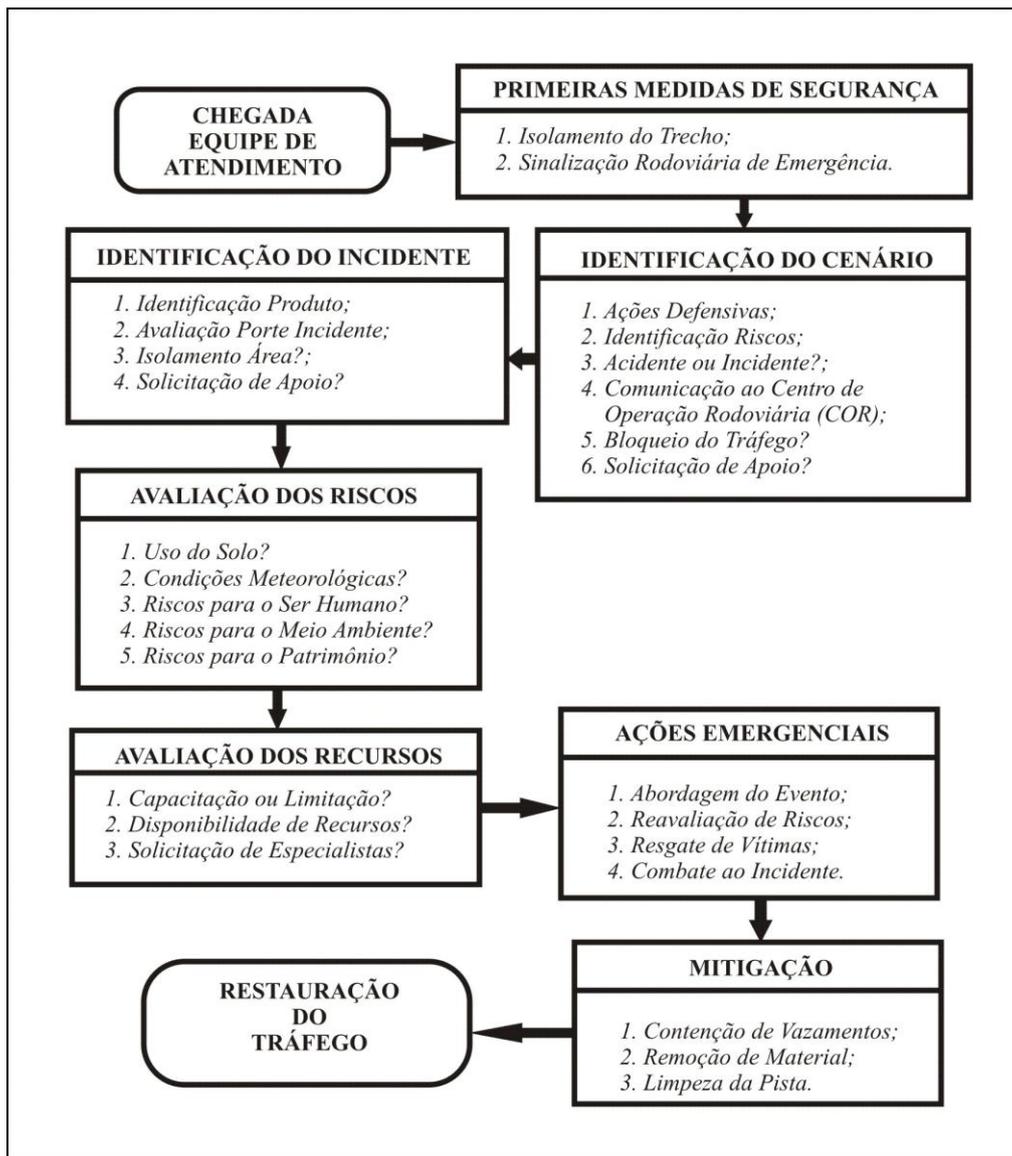
Em nível federal, o IBAMA vem atuando, de forma incisiva no acompanhamento dos acidentes ambientais ocorridos. Este órgão vem realizando vistorias e dando as orientações adequadas para minimizar os efeitos dos danos ambientais, além de verificar se as ações tomadas pelos responsáveis estão apropriadas ao acidente ocorrido. Tem disponibilizado ainda relatórios anuais sobre acidentes ambientais com os dados coletados através de seu monitoramento por todo o país. Tal monitoramento tem o intuito de traçar as estratégias de prevenção e buscar formas para melhorar a capacidade de resposta a esses eventos de maneira a minimizar as consequências (IBAMA, 2009).

Existem ainda as rodovias que se encontram sob concessão. Estas dispõem de equipes de emergência e resgate, treinadas para o atendimento de alguns tipos de eventos. Contudo, outras instituições também estão presentes de forma indireta no atendimento emergencial, como por exemplo, alguns órgãos de normatização (ABNT e INMETRO), e de regulação/controle do transporte terrestre (ANTT e DNIT) (STRAUCH, 2004).

Entretanto, as situações particulares de cada produto requerem, em caso de acidente, um alto grau de capacitação para o pronto atendimento no momento do acidente. Sendo assim, apesar de indispensável, o envolvimento dos órgãos governamentais de segurança não é suficiente para diminuir os efeitos da ocorrência de qualquer tipo de acidente com produtos perigosos nas rodovias, tornando a empresa proprietária do material transportado e a transportadora as principais responsáveis pelas medidas corretivas e preventivas (SCHENINI *et. al.*, 2006).

Dessa forma, a definição dos procedimentos dos diversos atores envolvidos em caso de emergência, constitui-se num fator importante para reduzir o impacto de um acidente com produtos perigosos. Assim evidencia-se que se trata de um trabalho em conjunto. Uma vez acontecido o acidente, a polícia rodoviária e/ou defesa civil são acionados, tomando as primeiras atitudes emergenciais, tais como: identificação do produto em questão; interdição da rodovia quando o produto envolvido oferecer riscos à segurança e à saúde humana. Em seguida, a situação é encaminhada para os órgãos ou pessoas competentes de acordo com a situação descrita por essas instituições. Os órgãos acionados recebem as informações preliminares e entram em contato com os demais atores necessários para combaterem os impactos ambientais (GUSMÃO, 2002; STRAUCH, 2004).

As etapas operacionais recomendáveis do atendimento emergencial na ocorrência de acidentes no transporte rodoviário de produtos perigosos são descritas na Figura 2.7. Elas podem ser divididas em três grupos: acionamento/comunicação, avaliação da ocorrência do acidente e medidas de controle.



Fonte: Real & Braga (2000).

Figura 2.7 - Etapas do atendimento emergencial rodoviário a veículos com produtos perigosos.

### 3 DISPERSÃO DE POLUENTES EM CURSOS D'ÁGUA

Este capítulo discorre sobre os conceitos e equações que determinam o transporte e a dispersão de poluentes em cursos d'água. Apresenta ainda para a determinação desses parâmetros de transporte e dispersão a técnica de traçadores.

#### 3.1 Transporte Difusivo-Advectivo

O transporte e a dispersão de poluentes em cursos d'água naturais podem ser representados por um modelo simplificado unidimensional, na forma da equação diferencial conhecida como equação da advecção-dispersão, deduzida a partir de um balanço de massa, onde os fluxos são regidos pela lei de Fick (BARBOSA JR *et al.*, 2005). Tal modelo pode ser adaptado para inúmeros cenários apresentando resultados satisfatórios (JOBSON, 1996; MAI *et al.*, 2007). Cabe salientar que para tal adaptação torna-se necessário que sejam calibrados alguns parâmetros, como por exemplo, geometria do rio, condições de contorno, coeficientes de dispersão, velocidade do corpo hídrico, vazão, entre outros (ANI, 2010).

No contexto desse modelo, inicialmente, considera-se a difusão molecular, a qual é caracterizada como um processo em nível microscópico, onde as partículas de uma substância são dispersas em outra devido ao gradiente de concentração em cada ponto. O processo de difusão molecular é regido pela lei de Fick, a qual estabelece que a taxa temporal do fluxo de massa dissolvida de uma substância, por unidade de área, é proporcional ao gradiente de concentração em uma dada direção (WILLIAMS, 2006; HUNSDORFER e VERWER, 2003). Matematicamente, o processo de difusão unidimensional pode ser representado como:

$$f = - D_m \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.1)$$

onde:  $f$  - fluxo de massa dissolvida ( $M L^{-2} T^{-1}$ )

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

$C$  - concentração da substância diluída ( $M L^{-3}$ )

$x$  - coordenada cartesiana da direção do fluxo (L)

O sinal negativo da equação indica que o fluxo de massa ocorre no sentido contrário ao gradiente de concentração, ou seja, a difusão molecular ocorre da região de maior concentração para a região de menor concentração (LIVI, 1997).

Aplicando a lei de conservação de massa a um volume de controle de largura  $\Delta x$  num fluido em repouso no qual só ocorra transporte de massa na direção  $x$ , a taxa temporal de variação de massa nesse volume deve ser igual à diferença entre a taxa de massa que entra (afluxo) e a que sai do volume de controle (efluxo), ou seja:

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t} \Delta x}_{\text{Massa acumulada em } \Delta t} = \underbrace{f \Delta x}_{\text{Afluxo}} - \underbrace{\left( f \Delta x + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x \right)}_{\text{Efluxo}} \quad (3.2)$$

simplificando, tem-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial f}{\partial x} \quad (3.3)$$

Ainda combinando a Equação (3.3) com a equação que expressa a lei de Fick (Equação 3.1), obtém-se, num dado instante  $t$ , a equação da difusão unidimensional, dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_m \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (3.4)$$

O transporte de massa do constituinte foi analisado, até agora, considerando-se apenas a difusão molecular. A partir desse ponto, considera-se o fluido apresentando uma velocidade  $v$ , com componente  $u$  na direção longitudinal. Assim, o transporte de massa provocado pelo movimento do fluido é denominado advecção (BÜGE, 1990). Desse modo, supõe-se que os processos de advecção e difusão são distintos, no entanto, ocorrem simultaneamente e seus efeitos podem ser superpostos. Assim, o deslocamento é provocado pelo fluxo advectivo, já o fluxo difusivo é responsável pelo espalhamento da substância solúvel no escoamento (SCHNOOR, 1996).

O fluxo advectivo de massa através de uma área unitária num plano  $yz$  em relação à componente da velocidade na direção  $x$  é equivalente ao produto escalar dado por:

$$u.C \quad (3.5)$$

Onde:

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

$C$  – concentração da substância ( $M L^{-3}$ ).

A taxa total de transporte de massa é dada pela parcela de advecção somada à parcela de difusão, ou seja:

$$f = \underbrace{u.C}_{\text{Fluxo Advectivo}} + \underbrace{\left(-D_m \frac{\partial C}{\partial x}\right)}_{\text{Fluxo Difusivo}} \quad (3.6)$$

Substituindo a Equação (3.6) na equação de conservação de massa unidimensional (Equação 3.4), obtém-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} = D_m \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right) \quad (3.7)$$

A Equação (3.7) é conhecida como equação da advecção-difusão considerando apenas a direção  $x$ . Por sua vez, esta equação é bastante utilizada na previsão da qualidade de água em rios, pois de acordo com RIBEIRO (2007), em cursos de água naturais, os mecanismos de transporte e dispersão de poluentes são mais relevantes ao longo da direção principal do fluxo. Além disso, a equação foi deduzida supondo constante o coeficiente de difusão molecular  $D_m$  em todas as direções, ou seja, considerando o regime de escoamento laminar.

Ressalta-se ainda, que a solução para a equação da dispersão unidimensional (Eq. 3.7) para uma massa de substância conservativa lançada pontualmente num corpo hídrico, foi obtida através da solução analítica proposta por Taylor<sup>2</sup> (TAYLOR, 1954), expressa por:

---

<sup>2</sup> Obtida para condutos fechados, no entanto largamente utilizada para canais, justificada pela sua simplicidade e pelos relativamente bons resultados obtidos ao ajustamento de uma solução analítica aos dados experimentais obtidos *in situ* (FISHER, 1979).

$$C(x, t) = \frac{M_{inj}}{S\sqrt{4\pi D_L t}} \exp\left(-\frac{(x-Ut)^2}{4D_L t}\right) \quad (3.8)$$

onde:

$C$  - concentração do constituinte ( $M L^{-3}$ );

$M_{inj}$  - massa de constituinte injetada (M);

$S$  - seção transversal do escoamento ( $L^2$ );

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

$x$  - distância entre o local de injeção e a seção de medição (L);

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

O modelo de Taylor permite a determinação da concentração da substância lançada de modo instantâneo, em uma dada seção, ao longo do tempo. Apesar da simplicidade do modelo, ele é amplamente utilizado, pois apresenta concordância dos resultados comparados a dados reais (FISHER, 1979; MAI *et al.* 2006, CAPLOW *et al.* 2004).

No entanto, para a determinação da concentração da substância lançada de modo contínuo num determinado tempo, torna-se necessário que a solução de Taylor seja combinada com a teoria de sistemas lineares invariante no tempo, de forma a trabalhar com essa característica. Dessa forma, a utilização da técnica de convolução proposta neste trabalho permite que lançamentos instantâneos sejam sobrepostos e assim seja obtida uma função que representa a injeção contínua de poluente em um determinado tempo.

Do mesmo modo, para a validação ou utilização confiável desse modelo, torna-se necessário a realização de estudos *in situ* que procuram determinar as características de cada corpo hídrico, evitando as imprecisões decorrentes do uso de fórmulas empíricas. Assim, a próxima seção apresenta as aplicações da técnica de traçadores artificiais em hidrologia.

### 3.2 Traçadores em Hidrologia

Segundo BEDMAR (1972), é denominado traçador qualquer substância ou produto que incorporado à massa de outra substância permite estudar seu comportamento em relação a um determinado processo físico ou químico. O uso de traçadores em hidrologia surgiu em função da necessidade do monitoramento da água, visto que esta técnica, de acordo com BEHRENS *et al.* (2001), permite obter informações sobre o fluxo da água bem como o transporte e os processos de mistura, tendo sido utilizados os mais diferentes tipos de traçadores. Estes, por sua vez, podem ser classificados como artificiais, quando adicionado intencionalmente pelo homem, e naturais, quando a substância é incorporada na água em consequência de processos naturais ou de derrames acidentais (ALEXANDER e QUINLAN, 1992).

Em estudos hidrológicos, destacam-se os traçadores artificiais fluorescentes e os radioativos, como os mais frequentemente empregados. Contudo, na década de 60, diante das limitações ao uso de traçadores radioativos e a busca por um substituto adequado, iniciou-se o uso extensivo dos traçadores fluorescentes (WILSON JR. *et al.*, 1986). De acordo com BENISCHKE, 1989, são definidos como compostos orgânicos ou inorgânicos que apresentam fluorescência tais como, por exemplo, os corantes fluorescentes usuais: fluoresceína, tinopal, rodamina-B, rodamina-WT, eosina, sulforadamina, entre outros.

Além disso, a utilização de substâncias fluorescentes em hidrologia deve-se também, a fatores como, a sua alta solubilidade em água, a facilidade de manuseio do material e a grande sensibilidade dos equipamentos que medem fluorescência. No entanto, existem também fatores que podem prejudicar a utilização de traçadores fluorescentes, tais como efeitos de temperatura, reação química, biodegradação, pH e fotodecomposição (SMART e LAIDLAW, 1977; BENISCHKE, 1989).

Dessa forma, a escolha do traçador é de fundamental importância para que represente as reais condições do escoamento em estudo, necessitando-se, em alguns casos, de um estudo prévio de laboratório e/ou de campo para comprovar o comportamento do traçador em relação ao corpo hídrico de interesse. Segundo RAMOS (2006), as características do sistema tais como o ponto de injeção do traçador, a localização dos pontos de medidas e a geometria de detecção devem ser bem definidas.

### 3.2.1 Aplicações de Traçadores

Os traçadores possuem grande aplicabilidade em diversas áreas científicas. Em hidrologia, de acordo com RIBEIRO (2007), podem ser utilizados para: a determinação de parâmetros de transporte e dispersão para alimentar modelos matemáticos; a medição de vazão; a determinação do coeficiente de reaeração em cursos de água; estudos sedimentológicos; planejamento prévio visando minimizar problemas ocasionados por despejos acidentais de poluentes, entre outros. Assim, muitos são os estudos que utilizam a técnica de traçadores para a determinação de características hidrológicas de um dado escoamento.

Nesse contexto, ROLDÃO *et al.* (1996), descreve os resultados obtidos na utilização de traçadores fluorescentes, Amidorodamina G Extra e Uranina, para a determinação dos coeficientes de dispersão longitudinal e transversal do escoamento na Laguna Setubal em Santa Fé, Argentina. As medições desses parâmetros *in situ* possibilitam uma melhor definição da problemática da qualidade de água do corpo hídrico em análise. Do mesmo modo, DEVENS (2006), através do uso de um traçador salino e ambientalmente neutro, quantifica o coeficiente de dispersão longitudinal em pequenos cursos d'água naturais da região de Ouro Preto, Minas Gerais.

Verificam-se ainda, estudos desenvolvidos visando à determinação de parâmetros de transporte e dispersão para alimentar modelos numéricos, como relatado por TEIXEIRA *et al.* (2007), o qual propõe uma nova técnica de calibração de modelo numérico, baseada no ajuste de curvas de passagem obtidas experimentalmente ao longo das unidades de contato, através do uso do traçador cloreto de potássio (KCl), e as obtidas pelo modelo numérico. Observa-se também, em MACHADO *et al.* (2008), a determinação experimental do coeficiente de dispersão para o trecho do rio Atibaia, através do uso do traçador do tipo sódio, a fim de simular a dispersão de substâncias solúveis através da utilização de um modelo fluidodinâmico computacional tridimensional, o qual permite predizer o impacto causado pela ocorrência de múltiplos pontos de emissão no trecho estudado. Contudo, além das características de dispersão, os traçadores podem ser bastante úteis na determinação da vazão de um corpo hídrico, como observado em ROLDÃO *et al.* (1998), o qual apresenta a metodologia utilizada na determinação desses parâmetros nos rios Corumbá e Pirapetinga.

Já em ROLDÃO *et al.* (1995), a técnica de traçadores foi utilizada para a determinação da capacidade de diluição de um emissário submarino da fábrica de papel

da Aracruz Celulose S.A., localizada no estado do Espírito Santo, através da utilização de traçadores fluorescentes. A utilização do corante fluorescente possibilita marcar o efluente, permitindo assim seu monitoramento após a mistura com a água do oceano. Do mesmo modo, PECLY (2000) utilizou a aplicação da técnica de traçadores ambientais e artificiais no monitoramento de emissários submarinos, em função da necessidade de monitorar o lançamento de efluentes e os riscos ambientais para diferentes situações hidrodinâmicas e climatológicas, aplicando a metodologia proposta no emissário submarino de Ipanema, no Rio de Janeiro.

### **3.2.2 Técnica de Traçadores como Apoio a Sistemas de Emergência em Corpos Hídricos**

A técnica de traçadores vem sendo utilizada ainda em apoio a sistemas emergenciais, visto que diante da importância e da necessidade de monitoramento de cursos d'água a possíveis acidentes com poluentes possibilita a elaboração de ferramentas de alarme utilizando essa técnica, a fim de determinar as características de transporte e dispersão de poluentes no corpo hídrico de interesse.

Nesse sentido, BROER (1991) aperfeiçoou o sistema de alarme a acidentes com poluentes no rio Reno, um dos mais importantes rios da Europa, onde cerca de 50 milhões de pessoas vivem em sua bacia de 185.000 km<sup>2</sup>. Esse modelo de alarme faz uma previsão da hora de chegada de um poluente e um perfil de concentração em um determinado ponto ao longo do Reno em caso de poluição acidental. Para isso, um grande número de parâmetros de qualidade da água são continuamente monitorados, através de estações operando 24 horas por dia, as quais informam alterações dos parâmetros em caso de poluição acidental. Assim, qualquer alteração nos parâmetros monitorados são transmitidos sinais através das estações de monitoramento, por meio de telefone e fax, às entidades responsáveis para que eles possam tomar as medidas adequadas a tempo. Cada estação tenta descobrir quais as substâncias que foram lançadas, o quanto foi derramado na água e por quanto tempo durou a passagem do poluente. O modelo foi calibrado e verificado com os resultados de uma série de testes com os traçadores fluorescentes Uranina e Rodamina WT, os quais determinaram os parâmetros de transporte e dispersão desse corpo hídrico.

Nesse mesmo rio, LEIBUNDGUT *et al.* (1993) realizou ensaios adicionais com traçadores visando à calibração e verificação do modelo de alarme, permitindo que os resultados da previsão fossem de alta precisão quando comparados com os parâmetros estimados por um modelo unidimensional.

Do mesmo modo, RIBEIRO (2007) desenvolveu um sistema de alerta computacional para contaminação de rios, chamado “Dispersão”, visando prever os efeitos de um lançamento de efluente em seções situadas a jusante do local de despejo. Para isso foram realizados dois ensaios de campo com uso de traçadores fluorescentes uranina ou fluoresceína sódica e amidorodamina G extra, para avaliar a capacidade de transporte e dispersão de poluentes solúveis no rio Pomba, em um trecho de 36 km entre as cidades de Astolfo Dutra e Cataguases. Na simulação do sistema de alerta é possível avaliar os efeitos do despejo de efluentes (instantâneo ou contínuo), como o tempo de trânsito, concentrações mínima, média e máxima, início e término da passagem da nuvem de poluentes em uma determinada seção de interesse à jusante do lançamento do efluente.

Esse modelo foi utilizado por SILVA *et al.* (2010), visando prever o transporte e dispersão de poluentes solúveis no trecho em que o rio Paraibuna corta a cidade de Juiz de Fora, com o objetivo de auxiliar na tomada de decisões nos processos de gerenciamento dos recursos hídricos.

A utilização de traçadores em apoio aos sistemas de emergências em corpos hídricos pode ainda ser observado em ROWIŃSKI (2006), MAI *et al.* (2006), WILSON, *et al.* (1995), ANI (2010), entre outros. No presente trabalho a técnica de traçadores é utilizada no planejamento preventivo de ações que visam minimizar os problemas ocasionados por despejos acidentais de poluentes num curso d’água. Esse método é adequado para a determinação dos parâmetros de transporte e dispersão de substâncias em escoamentos naturais, sendo estes essenciais na determinação do tempo de passagem de uma nuvem de poluente em um trecho do curso de água. Assim, permite prever os períodos para os quais a captação de água nos locais situados a jusante do ponto de despejo do poluente deve ser suspensa. Contudo, possibilita ainda determinar os possíveis locais a jusante do despejo onde o poluente representa maiores riscos.

### 3.2.3 Determinação do Coeficiente de Dispersão Longitudinal

A determinação do coeficiente de dispersão longitudinal pode ser realizada por equações empíricas ou por experimentos de campo, através do método de traçadores. Nas equações empíricas, o coeficiente de dispersão longitudinal é estimado em função das características do rio, com o produto de um coeficiente adimensional por parâmetros do escoamento. Essas equações relacionam o coeficiente com quantidades físicas, como profundidade média, largura, declividade e velocidade média ou vazão do escoamento (RIGO, 1992; DEVENS *et al.*, 2006; MACHADO, 2006). Contudo, estas formulações, apesar da facilidade de uso, são comprometidas pelas grandes imprecisões a elas inerentes.

Os experimentos de campo com uso de traçadores são aqueles que utilizam as distribuições de concentrações obtidas em ensaios de dispersão longitudinal, realizados com substância traçadora para calcular o coeficiente de dispersão longitudinal. Constitui-se assim, segundo RIGO (1992), a forma mais adequada de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal, uma vez que simulam corretamente o movimento e a dispersão do soluto, considerando todas as particularidades geométricas e hidrodinâmicas do escoamento no trecho do rio ensaiado. Nesse método o traçador é injetado no escoamento e amostras de água são coletadas ao longo do tempo em uma ou mais seções a jusante da injeção. Estes métodos têm como base a equação do transporte unidimensional (RIBEIRO, 2007).

## **4 METODOLOGIA**

Este capítulo tem como objetivo descrever a metodologia utilizada para avaliar o efeito de cargas poluidoras oriundas de acidentes rodoviários na qualidade de água dos usuários localizados entre a estação elevatória de Santa Cecília e a captação da ETA Guandu. Serão descritos como parte da metodologia empregada: a seleção da área e dos locais de estudo; o conceito da convolução aplicada a sistemas lineares, a qual será utilizada para a simulação de um poluente de forma contínua a partir de uma injeção instantânea de traçador; a utilização da técnica de traçadores para a determinação dos parâmetros de transporte e dispersão de poluentes; e o modelo de cálculo utilizado para determinar a concentração em uma dada seção ao longo do tempo nas simulações realizadas.

### **4.1 Seleção da Área de Estudo**

A área de estudo deste trabalho foi selecionada por estar localizada em um trecho de vital importância para o gerenciamento dos recursos hídricos do Estado do Rio de Janeiro, pois está situada a montante da ETA Guandu, a qual é responsável pelo abastecimento de água local e de 85% da população da RMRJ. A hidrografia considerada compreende um trecho de curso d'água com extensão de aproximadamente 80 km, situado entre a estação elevatória de Santa Cecília e a captação da ETA Guandu, onde há uma série de rodovias estaduais e federais que margeiam ou interceptam os corpos d'água a serem estudados os quais podem ser atingidos por substâncias perigosas caso haja algum acidente nessas rodovias. A área de estudo possui um pólo industrial significativo, com grandes indústrias, o que potencializa a utilização destas vias como rota de movimentação de produtos perigosos produzidos ou utilizados por essas indústrias.

Uma vez definida a área de estudo, identificou-se os principais pontos críticos desta região, tanto de lançamento como de captação, utilizados para as simulações dos cenários de interesse, com o auxílio de mapas elaborados com ferramentas de um sistema de informação geográfica através de dados disponibilizados por VIANA (2009)

e pelo Laboratório de Hidrologia da COPPE/UFRJ. Esses tópicos serão discutidos em detalhes no Capítulo 5 na apresentação do estudo de caso.

## 4.2 Sinais e Sistemas Lineares

Nesta seção são apresentadas as bases da teoria de sistemas. As definições de sistemas invariantes no tempo, linearidade, resposta impulsional e a técnica de convolução e deconvolução são discutidas.

### 4.2.1 Conceitos Fundamentais

O estudo de sinais e sistemas consiste na análise de sinais e na caracterização de sistemas excitados por sinais. Um sinal pode ser entendido como uma entidade que carrega informação ou dados que são usados como estímulo para o sistema. Em geral, um sinal pode representar uma variável física que varia com o tempo, com o espaço ou outras variáveis independentes. Um sistema opera sobre um sinal de entrada manipulando-o de acordo com suas regras e/ou interconexões produzindo uma resposta (sinal de saída) conforme ilustrado na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Diagrama simplificado de um sistema.

A análise de um sistema consiste no estudo do comportamento do próprio sistema e de seus sinais associados de entrada e saída, como por exemplo, a síntese de som, análise de espectro de ressonância magnética, reconhecimento de padrões, análise de estímulos e respostas em sistemas hidrológicos, entre outros (HAYES, 1998; LYONS, 2011).

Sinais podem ser classificados como contínuos ou discretos no tempo. Sinais contínuos são aqueles definidos ao longo de todo o tempo e assim, são representados por variáveis contínuas independentes. Já os sinais discretos são definidos em instantes

discretos do tempo e, portanto, as variáveis independentes que os representam assumem valores discretos, isto é, eles são representados como uma sequência de números. Sinais digitais, por exemplo, são sinais que possuem representação discreta no tempo e também possuem amplitude discretizada (HAYNKIN & VEEN, 1999).

Neste trabalho conceitos de sinais e sistemas foram aplicados ao estudo do transporte de poluentes em sistemas hidrológicos: os sinais de entrada são representados pelas quantidades de massa do poluente lançado no corpo hídrico, caracterizados como sinais discretos no tempo, uma vez que foram determinadas em instantes discretos de tempo. Já o sistema será caracterizado através de curvas de concentração ao longo do tempo determinadas pela técnica de traçadores fluorescentes descrita na próxima seção. Por fim, o sinal de saída representará a variação da concentração do poluente no corpo hídrico no decorrer do tempo.

#### 4.2.2 Sinais Discretos no Tempo

Matematicamente, um sinal contínuo no tempo é uma função que varia no tempo,  $x(t)$ , assumindo um valor real definida para todo  $t$ . Já os sinais discretos no tempo são representados por uma sequência de números  $x[n]$  representada de acordo com a Equação 4.1.

$$x = \{x[n]\}, -\infty < n < \infty \quad (4.1)$$

onde  $n$  é um número inteiro.

A Figura 4.2 representa um sinal discreto no tempo.

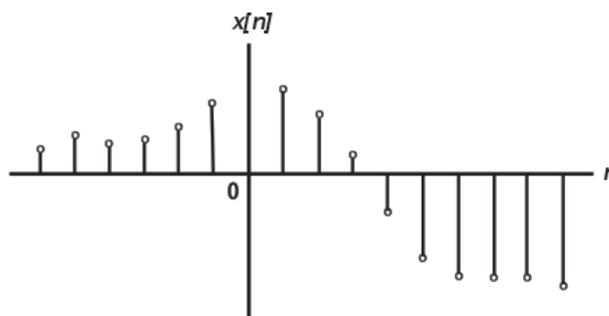


Figura 4.2 - Representação gráfica de um sinal discreto no tempo.

No presente trabalho  $x[n]$  representa a massa de poluente injetada no sistema em instantes discretos de tempo  $t=0,1,2,\dots, n$ .

### 4.2.3 Sistemas Lineares

Um sistema discreto é definido como uma transformação ou operador que mapeia uma sequência de entrada com valores  $x[n]$  em uma sequência de saída com valores  $y[n]$ , conforme representado pela Figura 4.3. Algebricamente, esse mapeamento é representado pela Equação 4.2.

$$y[n] = T\{x[n]\} \quad (4.2)$$

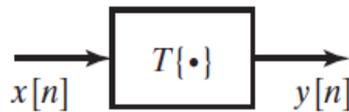


Figura 4.3 - Representação de um sistema discreto no tempo.

Um sistema discreto no tempo é dito linear se satisfaz a seguinte propriedade: para quaisquer dois sinais de entrada  $x_1[n]$  e  $x_2[n]$ , e uma constante real arbitrária  $a$ , o sistema resultante satisfaz:

$$T\{x_1[n] + x_2[n]\} = T\{x_1[n]\} + T\{x_2[n]\} \quad (4.3)$$

e,

$$T\{ax_1[n]\} = aT\{x_1[n]\} \quad (4.4)$$

Essa definição também conhecida como princípio da sobreposição pode ser generalizada para uma quantidade arbitrária de sinais de entrada (HAYES, 1998).

Outro conceito importante sobre sistemas é a definição de sistema linear invariante no tempo. Diz-se que um sistema linear é invariante no tempo se ele obedece à propriedade de invariância de deslocamento, isto é: se a resposta de um sinal de entrada  $x[n]$  é:

$$y[n] = T\{x[n]\} \quad (4.5)$$

Então para qualquer constante real  $n_a$  é verdade que,

$$y[n - n_a] = T\{x[n - n_a]\} \quad (4.6)$$

#### 4.2.4 Resposta Impulsional e Convolução

O sinal  $h[n]$  que descreve o comportamento de um sistema linear invariante no tempo (SLIT) é denominado resposta impulsional do sistema, pois ele é o sinal de saída do sistema quando o sinal de entrada é um impulso unitário,  $x[n] = \delta[n]$ . A propriedade de invariância no tempo implica que se  $h[n]$  é o sinal resposta para um sinal de entrada  $\delta[n]$ , então a resposta para  $\delta[n-k]$  é dada por  $h[n-k]$ . Essa propriedade pode ser generalizada para obter a resposta do sistema a um dado estímulo. De acordo com HAYES (1998), a resposta do sistema a qualquer entrada pode ser expressa em termos das respostas do sistema para as sequências  $\delta[n-k]$  através da equação (4.7).

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k] T\{\delta[n-k]\} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k] h_k[n] \quad (4.7)$$

Como um sistema linear invariante no tempo é caracterizado pela sua resposta impulsional  $h[n]$  de forma que, dado  $h[n]$ , é possível usar a equação (4.7) para calcular o sinal de saída  $y[n]$  para qualquer sinal de entrada  $x[n]$  (Figura 4.4).

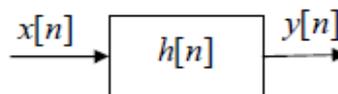


Figura 4.4 – Representação esquemática de um sistema.

A equação 4.7 é conhecida como soma da convolução do sinal discreto. Se  $y[n]$  é uma sequência cujos valores são obtidos pela relação de duas outras sequências,  $h[n]$  e  $x[n]$ , então  $y[n]$  é obtida pela convolução de  $x[n]$  com  $h[n]$ , e pode ser representada pela Equação (4.8).

$$y[n] = x[n] * h[n] \quad (4.8)$$

A Figura 4.5 representa o resultado da convolução de um sinal  $x$  com um sinal  $h$  obtendo um sinal de saída  $x*h$ .

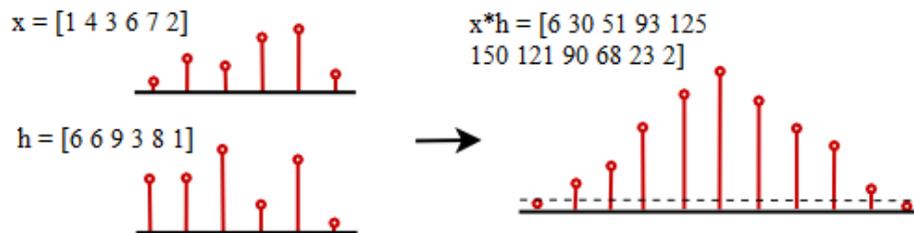


Figura 4.5 - Exemplo de aplicação da técnica de convolução.

Desse modo, essa forma de convolução expressa a saída de um sistema de tempo discreto em termos da entrada e da resposta impulsional do sistema, e será utilizada neste trabalho para simular o lançamento contínuo de poluente em determinado tempo a partir da soma das respostas impulsiais de lançamentos instantâneos discretizados no tempo. Já a deconvolução consiste na operação inversa da convolução, isto é, a partir do sinal resposta do sistema e do sistema obter o sinal de entrada, ou no caso do presente trabalho, a partir da variação da concentração do poluente no corpo hídrico no decorrer do tempo e da concentração do traçador pode-se estimar a quantidade do poluente e/ou a posição do derramamento do poluente no corpo hídrico.

A função do aplicativo Matlab chamada CONV avalia a convolução de sinais discretos no tempo com duração finita. Se  $x$  e  $h$  são vetores que representam sinais, o comando  $y = conv(x, h)$  do Matlab gera um vetor  $y$  que representa a convolução dos sinais representados por  $x$  e  $h$ . O número de elementos em  $y$  é dado pela soma do número de elementos em  $x$  e  $h$  menos um. Já a função do Matlab chamada DECONV avalia a deconvolução sendo expressa por  $[Q,R] = deconv(h, y)$ .

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizadas as funções do Matlab cuja descrição é apresentada a seguir (Mathworks, 2010).

- CONV – convolução e multiplicação polinomial:

$C = CONV(A, B)$  realiza convolução entre os vetores  $A$  e  $B$ . O vetor resultante tem comprimento  $MAX([LENGTH(A)+LENGTH(B)-1,LENGTH(A),LENGTH(B)])$ . Se  $A$  e  $B$  são vetores de coeficientes polinomiais, realizar a convolução é equivalente a multiplicar os dois polinômios.

- DECONV – Deconvolução e divisão polinomial:

$[Q,R] = \text{DECONV}(B, A)$  deconvolui o vetor A do vetor B. O resultado é retornado no vetor Q e o resto no vetor R, tal que  $B = \text{CONV}(A, Q) + R$ . Se A e B são vetores de coeficiente polinomiais, a deconvolução é equivalente a divisão polinomial. O resultado da divisão de B por A é o quociente Q e o resto R.

Os conceitos de sistemas e sinais apresentados nesta seção foram aplicados a estudos de transporte de poluentes em corpos hídricos a partir do uso da técnica de traçadores fluorescentes para obter as respostas impulsivas da área de estudo.

### 4.3 Utilização da Técnica de Traçadores

A técnica de traçadores possui grande aplicabilidade em hidrologia, como: a medida de vazão líquida, determinação do coeficiente de reaeração em cursos de água, estudos sedimentológicos, entre outras, conforme apresentado na seção 3.2.1. Neste trabalho essa técnica foi utilizada para a determinação de parâmetros de transporte e dispersão, através de ensaios *in situ*, para auxiliar o planejamento de ações e minimizar problemas ocasionados por despejos acidentais de poluentes.

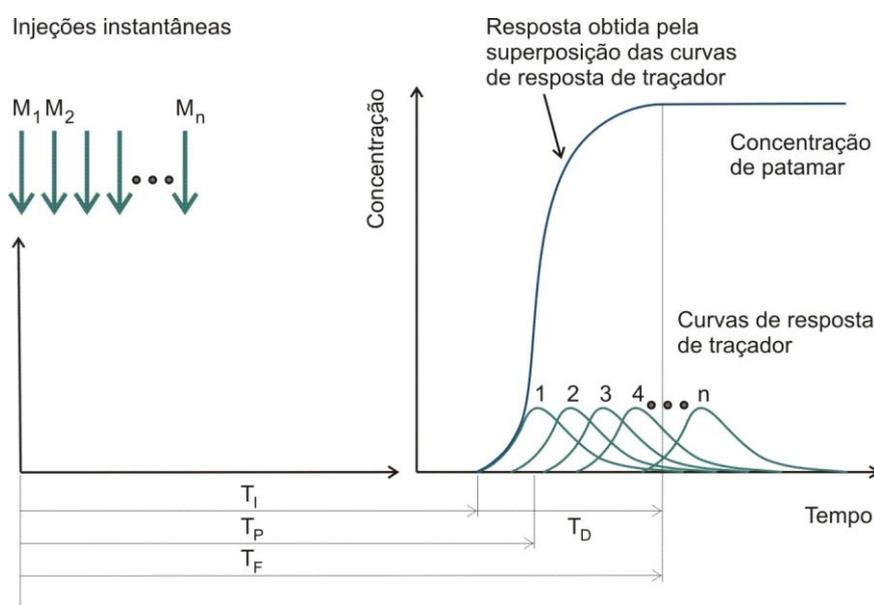
Os ensaios com traçadores na área de estudo foram realizados pelo Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ. Para isso, foi realizado um pré-dimensionamento – através de uma simulação – com o objetivo de estimar as quantidades de traçadores necessárias para promover uma marcação adequada da massa d'água em trânsito e avaliar a frequência e duração das coletas de amostras (COPPETEC, 1991; COPPETEC, 2003). Essa simulação visa fornecer dados que permitem avaliar quanto traçador deve ser injetado e quanto tempo cada equipe de monitoramento deve permanecer nos locais de observação.

A injeção do traçador, no trecho a ser analisado, foi realizada de forma instantânea. Esse método de injeção consiste de um lançamento rápido dos traçadores previamente diluídos em um volume de água coletada no local. Possui vantagens diante sua simplicidade, menor quantidade de traçador utilizada e, conseqüente, economia dos gastos inerentes ao ensaio. Entretanto, KILPATRICK e COBB (1985) afirmaram que a utilização do método de injeção contínua é preferível, apesar da exigência de um

dispositivo adicional que auxiliará na injeção do traçador com uma vazão constante de forma confiável e precisa.

Os corantes fluorescentes utilizados como traçadores foram Uranina (Color Index: 45350) e Amidorodamina G também conhecido por “Acid Red 50” (Color Index: 45220) os quais são amplamente empregados em estudos relacionados com a hidrologia subterrânea e superficial (BENISCHKE, 1989). São corantes reconhecidamente inócuos à saúde de seres vivos, que podem ser detectados em concentrações extremamente baixas através de métodos instrumentais (BEHRENS et al., 2001).

Para este trabalho, o lançamento do poluente será considerado de forma contínua no corpo hídrico. Com relação a esse método, KILPATRICK e COBB (1985) mostraram que a curva de resposta de uma injeção contínua de traçador pode ser simulada pela adição de curvas de resposta do traçador a partir de uma única sequência de injeções instantâneas considerando o mesmo fluxo, local e vazão. A Figura 4.6 ilustra essa superposição das curvas de resposta através de uma série de injeções instantâneas de traçador (simulando uma injeção constante), onde cada injeção instantânea é representada por uma massa  $M_n$  injetada no corpo hídrico.



Fonte: Adaptado de KILPATRICK e COBB (1985).

Figura 4.6 – Representação esquemática da superposição das curvas de resposta do traçador a partir de injeções instantâneas.

Assumindo que a vazão do escoamento é constante, a série de injeções instantâneas de traçador com quantidades iguais,  $M_1, M_2, M_3... M_n$ , em intervalos de tempo uniformes (injeção de taxa constante), resultará em uma série de curvas respostas

idênticas deslocadas no tempo. A continuação da injeção após  $T_F$  resultaria em um patamar de concentração constante nesse ponto, enquanto a vazão do corpo hídrico e a taxa de injeção do traçador não variarem. Assim, como pode ser visto na Figura 4.6, para um patamar ser alcançado em um determinado local, uma injeção constante deve ser mantida por um período de tempo igual à duração da curva resposta do traçador  $T_D$ .

Dessa forma, as curvas de respostas de traçador produzidas por injeções instantâneas podem ser usadas para simular o lançamento contínuo de determinado poluente através do princípio da superposição implementado através da convolução, detalhada na seção anterior (Equação 4.7). No presente trabalho, a técnica de injeção instantânea de traçadores será utilizada como uma ferramenta para simular um acidente com lançamento contínuo. Para possibilitar a comparação do comportamento das curvas de passagem do traçador para as diferentes injeções realizadas no trecho, foi realizada a normalização das curvas de passagem, ou seja, as suas ordenadas são as concentrações das curvas originais divididas pela área integrada em toda a curva, conforme representado pela equação abaixo (KILPATRICK & COBB, 1985).

$$M = Q \int_0^{\infty} C(t) dt \quad (4.9)$$

onde:

$M$  - massa injetada (M);

$Q$  - vazão ( $L^3 T^{-1}$ );

$C(t)$  - concentração da curva de passagem do traçador ( $M L^{-3}$ ).

A partir da curva de passagem de traçador nas seções de monitoramento, os valores da velocidade média de trânsito ( $U$ ) e do coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ) foram obtidos por ajustamento, tendo como base a solução de Taylor. A descrição dos ensaios com traçadores realizados na área de estudo será apresentada no próximo capítulo.

#### 4.4 Modelo de Cálculo Utilizado

Neste estudo, o cálculo do transporte e da dispersão do poluente foi realizado através do modelo de Taylor, conforme representado pela equação (4.10). Esse modelo foi obtido a partir da solução da equação de transporte advectivo-dispersivo para o caso unidimensional (Equação 3.7) e prediz que a distribuição de concentração com a distância em um dado tempo segue uma forma gaussiana (RUTHERFORD, 1994).

$$C(x,t) = \frac{M_{inj}}{S\sqrt{4\pi D_L t}} \exp\left(\frac{-(x-Ut)^2}{4D_L t}\right) \quad (4.10)$$

onde:

$C$  - concentração do constituinte ( $M L^{-3}$ );

$M_{inj}$  - massa de constituinte injetada (M);

$S$  - seção transversal do escoamento ( $L^2$ );

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

$x$  - distância entre o local de injeção e a seção de medição (L);

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

Embora derivada originalmente para escoamentos permanentes e uniformes, a equação (4.10) tem ampla utilização em escoamentos naturais onde a hipótese de seção constante dificilmente se cumpre. O uso da fórmula de Taylor é justificado ainda pela sua simplicidade e pelos bons resultados obtidos, sob o ponto de vista de engenharia, no que se refere ao ajustamento de uma solução analítica aos dados experimentais obtidos *in situ* (FISHER, 1979).

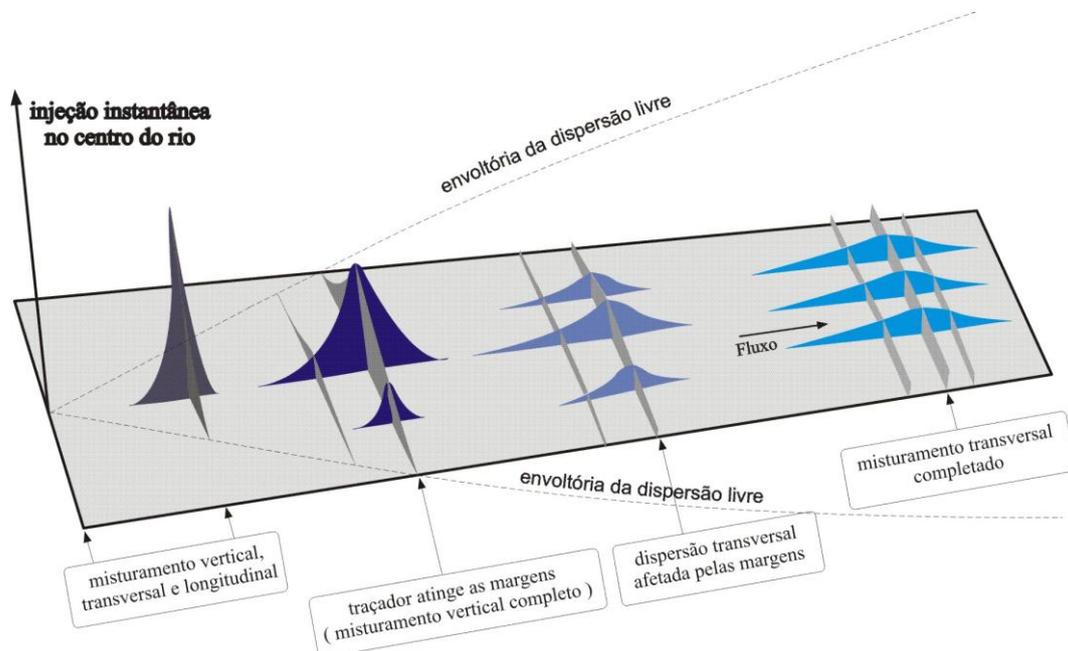
Vale ressaltar que a fórmula de Taylor permite a determinação da concentração da substância lançada de modo instantâneo, em uma dada seção, ao longo do tempo. No entanto, para o presente estudo foi considerado o lançamento do poluente de forma contínua no corpo hídrico. Assim, a utilização da técnica de convolução proposta neste trabalho permite que lançamentos instantâneos sejam sobrepostos e assim seja obtida uma função que representa a injeção contínua de poluente.

#### 4.4.1 Aplicabilidade do Modelo

A fórmula de Taylor, utilizada neste trabalho para a determinação da concentração do poluente em uma dada seção ao longo do tempo, a partir da estimativa dos parâmetros de transporte e dispersão de poluentes através do ajuste das curvas de traçador determinadas *in situ* e a curva gerada por esta equação, possui algumas restrições para ser aplicada, uma vez que apresenta uma simplificação do que ocorre na natureza.

Desse modo, de acordo com TAYLOR (1954) para a validade da equação, supõe-se que o coeficiente de dispersão se mantém constante, fato que só ocorre caso o traçador tenha percorrido uma distância considerável desde o ponto de injeção, denominada distância de boa mistura, para que ocorra a completa diluição do poluente por toda a seção transversal em estudo. Portanto, o ponto de análise deve localizar-se a uma distância suficientemente a jusante do ponto de injeção para que ocorra a mistura completa do poluente com a água do escoamento.

A Figura 4.7 é uma representação esquemática dessa condição indicada pela mistura transversal completa.



Fonte: Adaptado de HUBBARD *et al.* (1982).

Figura 4.7 - Representação esquemática do processo de mistura em rios e da distância de boa mistura.

Como condição de aplicabilidade do método é necessário atender a hipótese de fluxo em regime permanente. Além disso, deve ser aplicado a substâncias solúveis e conservativas, ou seja, substâncias com capacidade de serem diluídas ou assimiladas pelo corpo d'água e que não sofrem degradação no ambiente aquático. Os traçadores utilizados nas campanhas de campo são, por suposição, conservativos e, assim, não sofrem decaimento ao longo do tempo. Portanto, o modelo proposto simula o comportamento de substâncias que tenham as mesmas características, ou seja, que não sofrem degradação no ambiente aquático.

#### **4.5 Dados Disponíveis e Simulações Propostas**

Nesse trabalho, as vazões que caracterizam o comportamento hidráulico do trecho foram obtidas através de séries históricas de postos fluviométricos existentes na região disponibilizados pela empresa de energia LIGHT S.A.

Os parâmetros de transporte e dispersão, ou seja, velocidades médias e coeficientes de dispersão no trecho de escoamento foram determinados a partir de dados de ensaios de traçadores já realizados na área de estudo pelo Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ nos anos de 1991 e 2003. Já os dados provenientes das características dos acidentes, dependem do cenário a ser simulado sendo necessário fornecer a massa despejada de poluente, a distância entre os pontos de lançamento e de captação, do mesmo modo que as características hidráulicas do trecho. Para a simulação proposta, será considerado o lançamento da carga de poluente de forma contínua no corpo hídrico através da convolução de séries de dados de uma injeção instantânea obtida dos experimentos de campo e as características do acidente.

Dessa forma, para a previsão do tempo de trânsito da nuvem de poluentes a partir de um despejo contínuo de um poluente, como consequência de acidentes rodoviários de produtos perigosos, foram construídos cenários de simulação visando apresentar situações futuras criadas com possíveis acidentes para apoiar as tomadas de decisão no presente, apresentando graficamente a distribuição temporal de concentrações da curva de passagem do poluente, em um determinado local, a jusante do ponto do seu lançamento.

## **5 ESTUDO DE CASO: ASPECTOS HIDROLÓGICOS E DESPEJOS ACIDENTAIS DE POLUENTE NA BACIA DO RIO GUANDU**

Este capítulo tem como objetivo caracterizar o trecho escolhido para a aplicação da metodologia proposta, apresentar uma descrição da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu (uma vez que, o trecho escolhido para o presente estudo, em sua maior parte, está inserido nessa bacia), apresentar resultados de estudos de campo para caracterizar o transporte de substâncias solúveis e definir as bases para os cenários que serão simulados.

### **5.1 A Bacia Hidrográfica do Rio Guandu**

Neste item será realizada uma breve descrição da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu incluindo características gerais, aspectos climáticos, uso e ocupação do solo, usos múltiplos da água, entre outros aspectos.

#### **5.1.1 Características Gerais**

A bacia hidrográfica do rio Guandu está localizada na II Região Hidrográfica do Estado do Rio de Janeiro, a qual abrange as bacias dos rios Guandu (1.385 km<sup>2</sup>), da Guarda (346 km<sup>2</sup>) e Guandu-Mirim (190 km<sup>2</sup>), conforme definido na Resolução CERHI nº 18, fazendo parte da bacia hidrográfica contribuinte à Baía de Sepetiba. Na bacia do rio Guandu, estão totalmente inseridos os municípios de Mangaratiba, Itaguaí, Seropédica, Queimados, Engenheiro Paulo de Frontin, Japeri e Paracambi e, parcialmente, os municípios de Miguel Pereira, Vassouras, Barra do Piraí, Mendes, Nova Iguaçu, Piraí, Rio Claro e Rio de Janeiro.

Dispondo de uma área de 1.385 km<sup>2</sup> e abrigando 420.023 habitantes, a bacia hidrográfica do rio Guandu possui como principal curso d'água o rio Guandu, o qual nasce da confluência de Ribeirão das Lajes com o rio Santana, ambos de domínio estadual, totalizando assim um curso de 48 km até a foz (SEMADS, 2001; ANA, 2006).

Tem como principais afluentes os rios Santana, São Pedro e Poços, onde neste deságua o rio Ipiranga e Queimados. As características básicas do rio formador e de seus principais afluentes são mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Principais Afluentes do Rio Guandu

Rio	Local da Nascente	Principais Tributários
Ribeirão das Lajes (formador)	Serra dos Cristais	<u>Contribuintes da Represa de Lajes:</u> Rio Bonito, Córrego Morro Azul, Córrego Patrícia, Córrego recreio, Rio Passa Vinte, Rio Piloto, Rio Bálsamo e Rio das Palmeiras e reservatório de Tocos. <u>Afluentes a jusante da UHE Pereira Passos:</u> Ribeirão da Floresta, Córrego do Bandá, Córrego Paraíso, Rio Saudoso, Rio dos Macacos, Vala Jonas Leal, Rio Cacaria, Rio da Onça e Valão do Areia.
Santana (afluente)	Serra do Couto	Rios Falcão, São da Barra, João Correia Vera Cruz, Santa Branca e Cachoeirão e Canal Paes Leme.
São Pedro (afluente)	Serra do Tinguá	-----
Poços (afluente)	Serra do Tinguá	Rio Santo Antônio, Rio Douro, Canal Teófilo Cunha, Canal Quebra Côco ou Morto, Canal Pepino, Canal Aníbal, Rio Queimados e Rio Ipiranga.

Fonte: SEMADS (1998).

A bacia do rio Guandu é de grande importância para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), uma vez que nela é feita a captação de água para a ETA Guandu operada pela CEDAE e responsável pelo tratamento e distribuição das águas do rio Guandu para abastecer cerca de 9 milhões de habitantes da RMRJ, sendo assim, considerado o maior sistema de tratamento de água do mundo (ANA, 2007; ALVES, 2003). Para permitir a utilização das águas para o abastecimento da RMRJ e geração de energia é feita a transposição de 2/3 das águas do rio Paraíba do Sul e de praticamente toda a vazão do curso superior do rio Piraí para a bacia do rio Guandu.

Vale ressaltar que essa bacia hidrográfica possui participação expressiva no PIB do estado do Rio de Janeiro, devido ao tamanho e a diversidade de seu parque industrial que vem se intensificando ao longo da bacia, o qual abriga empresas como a GERDAU, AMBEV, Eletrobolt, entre outras.

Desde abril de 2002, a bacia hidrográfica do Guandu dispõe de um comitê (Comitê Guandu), e sua área de atuação compreende a bacia do rio Guandu, incluída as nascentes do Ribeirão das Lajes, as águas desviadas do Paraíba do Sul e do Piraí, os afluentes ao Ribeirão das Lajes, ao rio Guandu e ao canal de São Francisco, assim como

as bacias hidrográficas dos rios da Guarda e Guandu-Mirim. O Comitê Guandu é responsável, entre suas diversas atribuições, por promover o gerenciamento descentralizado, participativo e integrado, sem dissociação dos aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos, em sua área de atuação.

Em adição aos aspectos gerais, a caracterização da bacia hidrográfica do Guandu é auxiliada pelo conhecimento dos principais aspectos climáticos descritos na próxima seção.

### **5.1.2 Aspectos Climáticos**

A bacia do rio Guandu é caracterizada por clima tropical úmido, com variações determinadas pelas diferenças de altitude. A temperatura média anual varia entre 20<sup>0</sup>C e 27<sup>0</sup>C e possui índices pluviométricos elevados, cuja média anual está entre 1000 mm a 2300 mm. A máxima precipitação pluviométrica é observada no período entre novembro e março, e a mínima de junho a agosto. Julho é caracterizado como o mês mais seco com precipitação média mensal de 50 mm e janeiro, o mais chuvoso, com média mensal de 300 mm. As temperaturas e pluviosidades são mais altas nas planícies e nas vertentes da Serra do Mar. No entanto, nos divisores da bacia, as temperaturas diminuem, e os períodos secos tendem a ser maiores (SEMADS, 2001; ANA, 2006).

### **5.1.3 Uso e Ocupação Atual do Solo**

O processo de ocupação e uso do solo da região hidrográfica do Guandu está diretamente relacionado às condições de relevo, ao desenvolvimento da RMRJ e sua relação com o eixo Rio - São Paulo, rota de importantes pólos industriais. Até os anos 50, predominava o uso agropecuário em toda a região. Contudo, na segunda metade do século XX, devido à industrialização do país, a ocupação urbana e industrial teve uma expansão a partir dos principais vetores de ocupação da bacia caracterizados inicialmente pelas ferrovias e, em seguida pelas rodovias. Nessa, o crescimento urbano vem acentuando-se ao longo das vias que ligam esses principais eixos rodoviários (ANA, 2006).

A Tabela 5.2 apresenta informações sobre a cobertura vegetal e o uso do solo na região hidrográfica do Guandu. A partir dos dados dessa tabela, observa-se que campos/pastagens predominam nas três sub-bacias. Contudo não significa que a pecuária seja uma atividade econômica importante na região e sim uma maneira de manter as propriedades privadas a um custo econômico relativamente baixo. Observa-se ainda que o uso agrícola se mantém em algumas áreas, embora a expansão das áreas urbanas e da atividade de extração mineral venha tomando o lugar dessas unidades agrícolas.

Tabela 5.2 – Vegetação e o uso do solo na Região Hidrográfica do Guandu.

Vegetação e Uso do Solo	Bacia rio Guandu		Bacia rio da Guarda		Bacia rio Guandu- Mirim	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Floresta (Ombrófila Densa)	41.723	30,2	2.053	6,1	1.760	9,8
Capoeira	23.847	17,3	2.362	7,0	3.097	17,0
Campo/pastagem	55.900	40,5	19.357	57,5	6.058	33,7
Área agrícola	2.851	2,1	1.470	4,4	1.514	8,4
Área urbana	8.697	6,3	4.328	12,9	4.734	26,4
Reflorestamento	344	0,2	1.051	3,1	-	-
Afloramento rochoso	82	0,1	-	-	2	0,0
Rios, Reservatórios	3.493	2,5	345	1,0	75	0,0
Áreas inundadas e inundáveis	665	0,5	732	2,2	420	2,3
Solo exposto	22	0,0	63	0,2	-	-
Mangue	43	0,0	-	-	66	0,4
Mangue degradado	-	-	14	0,0	-	-
Área industrial	251	0,2	-	-	169	0,9
Extração mineral	259	0,2	1.903	5,7	62	0,3
<b>Total</b>	<b>138.177</b>	<b>100,0</b>	<b>33.678</b>	<b>100,0</b>	<b>17.955</b>	<b>100,0</b>

Fonte: ANA (2007).

A caracterização do uso e ocupação atual do solo torna-se necessária, uma vez que auxilia no entendimento dos processos que contribuíram para a degradação da bacia, entre eles o comprometimento dos recursos hídricos, já que a ocupação desordenada caracteriza-se como um dos fatores que contribuem para a degradação da qualidade das águas, as quais são utilizadas para diversos setores da bacia do rio Guandu.

### 5.1.4 Usos Múltiplos da Bacia

As águas da bacia do rio Guandu são utilizadas para diversos usos, dentre eles, o abastecimento público, geração de energia, diversas atividades produtivas e diluição de efluentes.

Vale ressaltar que as águas da bacia do rio Guandu são ainda utilizadas para a preservação ambiental, pesca, recreação e navegação, já que esta é servida por ampla e extensa rede viária. A preservação ambiental é imprescindível, uma vez que toda a bacia a montante da captação da CEDAE é de grande importância para a qualidade desse manancial vital de abastecimento da RMRJ. Sendo assim, em todas as sub-bacias contribuintes existe a necessidade de ações voltadas para a proteção das áreas de preservação permanente (APP) dos corpos d'água.

A Tabela 5.3 sintetiza os principais setores de utilização das águas da bacia do rio Guandu, onde se observa que o principal uso dos recursos hídricos desta bacia é o abastecimento público seguido do setor industrial.

Tabela 5.3– Principais tipos de uso e vazão de captação correspondente.

Uso / Setor	Vazão de captação (m <sup>3</sup> /s)
Abastecimento Público	45,100
Indústria	13,510
Agropecuária e aquicultura	0,168
<b>Captação Total (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>58,778</b>

Fonte: Adaptado de ANA (2007).

Contudo, para garantir o volume suficiente e excedente de água para esses usos, é necessária a captação e transposição de 2/3 da vazão do Rio Paraíba do Sul e de praticamente toda a vazão do curso superior do rio Pirai para o Reservatório de Lajes (ANA, 2006).

### 5.1.5 Transposição da Bacia do Rio Paraíba do Sul

De acordo com CAMPOS (2001), a transposição das águas do rio Paraíba do Sul para o rio Guandu trouxe benefícios significativos para o Estado do Rio de Janeiro, como: o fornecimento de energia elétrica, por intermédio de várias usinas hidrelétricas; fonte de água para consumo da RMRJ; suprimento das necessidades dos usuários

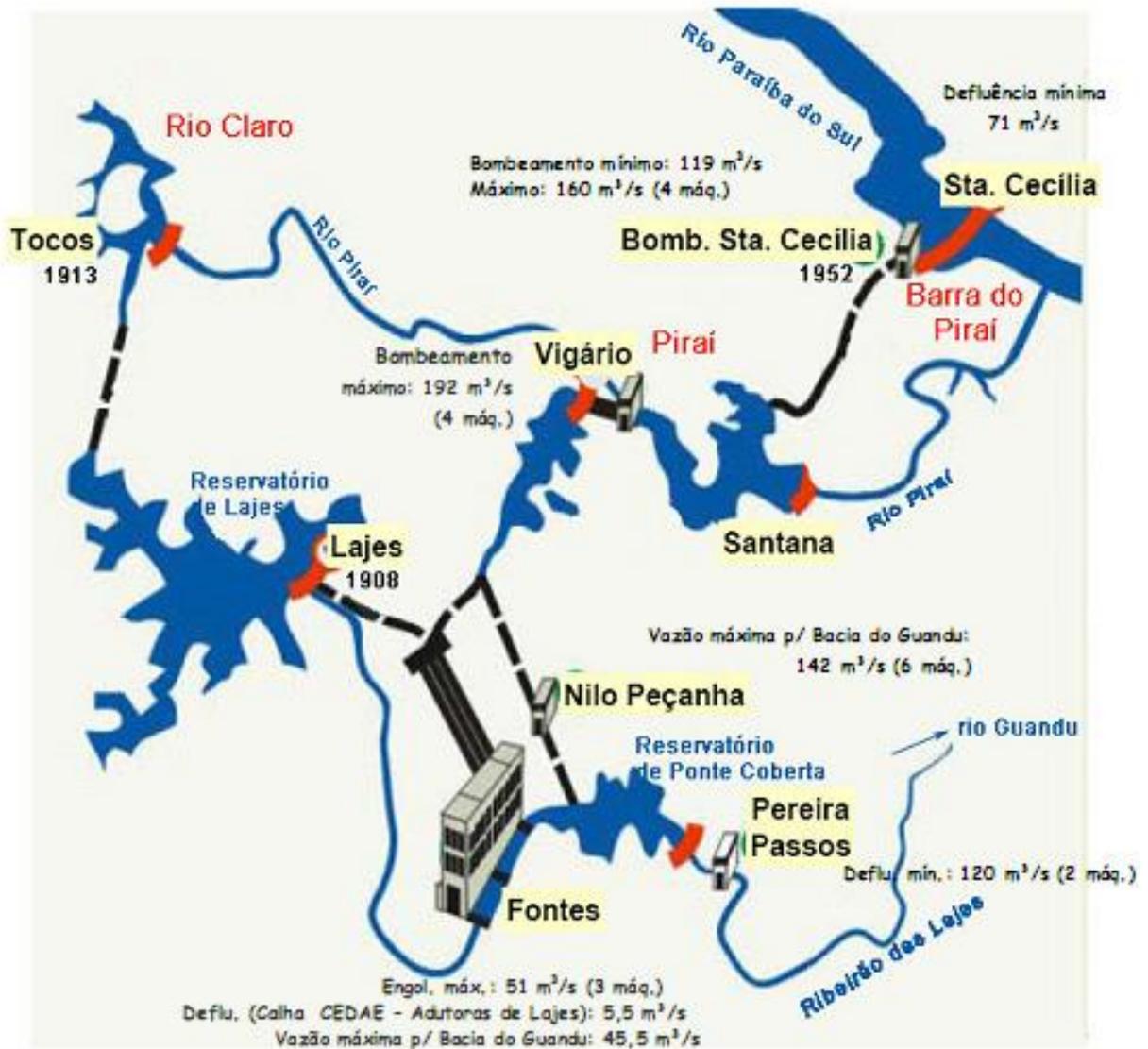
instalados no rio Guandu e garantia de uma vazão para conter a cunha salina na foz do canal de São Francisco.

Realizada em 1952 e viabilizada pelo Complexo Hidrelétrico de Lajes, de propriedade da Light Serviços de Eletricidade S.A, empresa operadora da concessão de energia elétrica no estado do Rio de Janeiro, a transposição das águas do rio Paraíba do Sul para o rio Guandu objetivava inicialmente ampliar a geração de energia elétrica, através de uma série de obras para permitir que as águas dos Rios Paraíba do Sul, Pirai e Vigário fossem transpostas para a bacia do Ribeirão das Lajes, tornando assim o principal contribuinte, em termos de volume de água, do rio Guandu (ANA, 2006). Contudo, esse novo panorama modificou o sistema hídrico da bacia do rio Guandu, possibilitando a exploração de suas águas para abastecimento da população da RMRJ, a qual é totalmente dependente desse sistema.

Além disso, a água desviada também é utilizada para outros fins como abastecimento industrial, preservação da flora e fauna e disposição final de esgotos. Dessa forma, a empresa Light possui outorga para captar no máximo 180 m<sup>3</sup>/s. Desse valor, 160 m<sup>3</sup>/s correspondem à captação no rio Paraíba do Sul pela Estação Elevatória de Santa Cecília, em Barra do Pirai e 20 m<sup>3</sup>/s correspondem às captações no rio Pirai, através da Elevatória de Vigário e Túnel do Reservatório de Tocos localizados em Pirai e Rio Claro, respectivamente (PEREIRA, 2006).

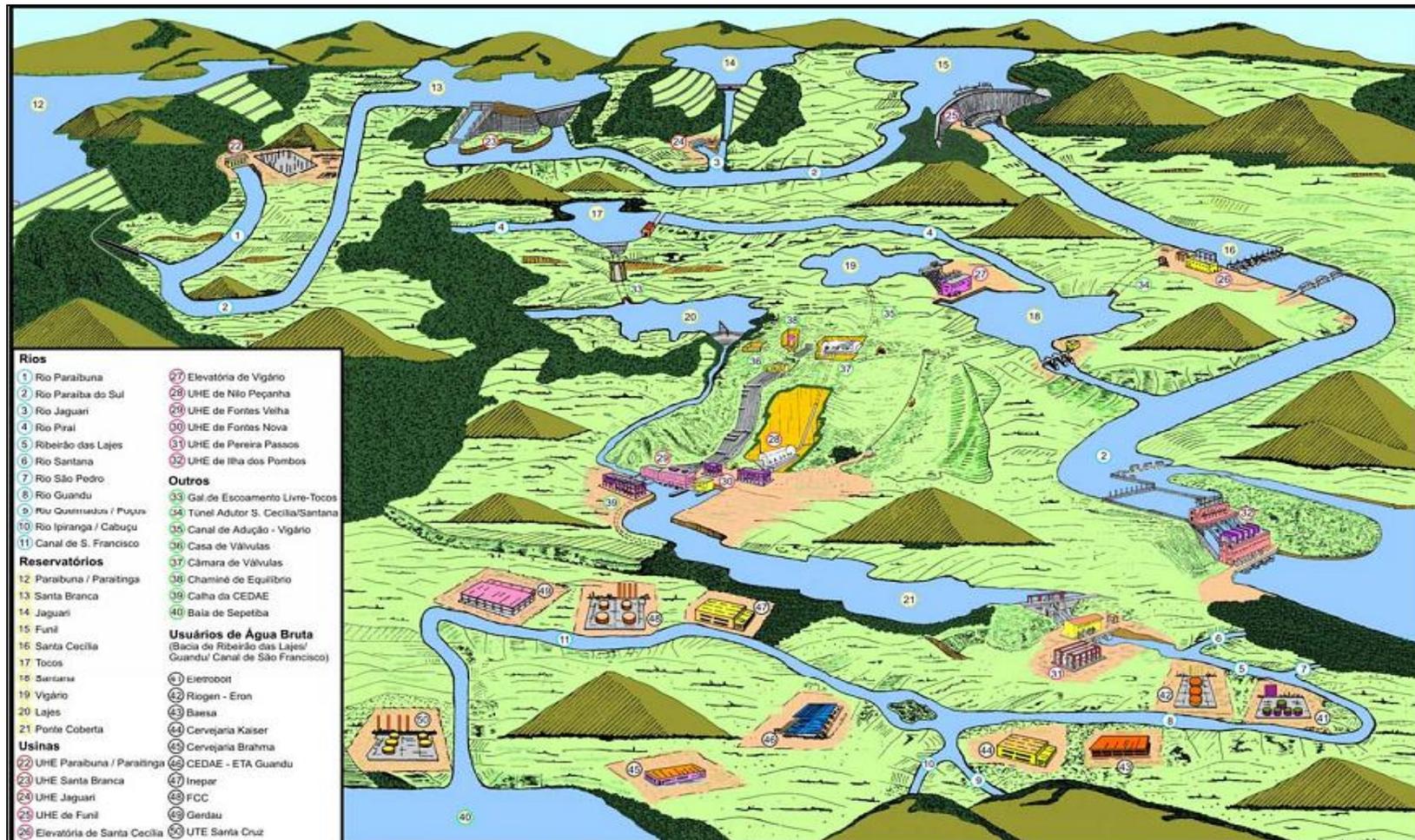
O processo de transposição é realizado pelas Usinas Elevatórias de Santa Cecília e de Vigário, as quais possuem recalque de 15 m e 35 m respectivamente. A geração de energia se dá nas usinas Nilo Peçanha, Fontes Nova e Pereira Passos. Desse modo, o rio Guandu, que em condições naturais teria uma vazão de cerca de 25 m<sup>3</sup>/s, recebe uma contribuição média de 146 m<sup>3</sup>/s do Desvio Paraíba-Pirai e de 10 m<sup>3</sup>/s do Desvio Tocos-Lajes. Essa contribuição adicional permitiu a construção, pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE), da Estação de Tratamento de Água (ETA) do Rio Guandu, que entrou em operação em 1955 e hoje processa 47 m<sup>3</sup>/s de água para atendimento à população da RMRJ (LIGHT, 2005; ANA, 2007).

A Figura 5.1 e Figura 5.2 indicam a representação esquemática da transposição das águas da bacia do rio Paraíba do Sul para a bacia do rio Guandu.



Fonte: LIGHT Energia *apud* ANA (2007).

Figura 5.1 - Esquema representativo do sistema de transposição das águas da bacia do rio Paraíba do Sul para a bacia do rio Guandu.



Fonte: CAMPOS, 2005.

Figura 5.2 - Representação esquemática do sistema hidráulico Paraíba do Sul e localização dos principais usuários de água na bacia do rio Guandu.

Visando atender as necessidades de captação da ETA Guandu em condições operacionais desfavoráveis, foi estabelecido através das resoluções 211/2003 e 465/2004 da ANA que a disponibilidade mínima de água para o rio Guandu é de 120 m<sup>3</sup>/s, ou seja, a vazão defluente Usina Hidrelétrica de Pereira Passos em condições críticas de estiagem deverá ser no mínimo 120 m<sup>3</sup>/s para garantir os múltiplos usos da bacia hidrográfica do Guandu.

Nesse contexto, de acordo com MOREIRA (2008), essa transposição, como já mencionado, criou uma oferta hídrica relevante na bacia receptora do rio Guandu, que se tornou o principal manancial de abastecimento de água da RMRJ e de várias indústrias, termelétricas e outras atividades ali situadas. Contudo, afirma ainda a necessidade de uma articulação entre os sistemas de gestão dessas duas bacias, uma vez que, quase a totalidade das águas do Guandu é oriunda da bacia do rio Paraíba do Sul.

## **5.2 Trecho Escolhido para Aplicação da Metodologia**

A seguir será descrito o trecho escolhido para a aplicação da metodologia proposta neste trabalho. Os mapas apresentados neste capítulo foram desenvolvidos em um programa de Sistema de Informação Geográfica através de informações disponibilizadas por VIANA (2009) e pelo Laboratório de Hidrologia da COPPE/UFRJ.

### **5.2.1 Características Gerais**

A área escolhida para a aplicação da metodologia compreende um trecho com cerca de 80 km de curso d'água localizado entre a estação elevatória de Santa Cecília, na bacia do rio Paraíba do Sul, e a montante da captação da ETA Guandu, situada na bacia do rio Guandu. Esse trecho é parte do “Sistema Guandu”, o qual de acordo com CARVALHO *et al.* (2007), é definido como o sistema hídrico formado pelo conjunto de rios, canais, reservatórios, usinas hidrelétricas, estações elevatórias e demais estruturas hidráulicas localizadas entre a estação elevatória de Santa Cecília, no rio Paraíba do Sul, e a foz do canal de São Francisco, na Baía de Sepetiba, que interliga as bacias hidrográficas do rio Paraíba do Sul com a do rio Guandu.

O rio Guandu é o principal manancial desse trecho e recebe as águas dos rios e córregos dos municípios que fazem parte da bacia hidrográfica do rio Guandu, bem como as águas transpostas do rio Paraíba do Sul, em Barra do Piraí, e do rio Piraí, no município de Piraí. As informações gerais de dados populacionais e área dos municípios que fazem parte da unidade de estudo estão apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Informações demográficas sobre os municípios pertencentes a região de estudo.

Município	Parâmetros	
	População em 2010	Área (km <sup>2</sup> )
Barra do Piraí	94.855	579
Piraí	26.309	505
Rio claro	17.401	841
Nova Iguaçu	795.212	521
Miguel Pereira	24.647	289
Itaguaí	109.163	276
Seropédica	78.183	284
Queimados	137.938	76
Engenheiro Paulo de Frontin	13.239	133
Japeri	95.391	82
Paracambi	47.074	180

Fonte: Portal IBGE – Banco de Dados cidades@ (2010).

Esse trecho foi selecionado por ser de vital importância para o gerenciamento dos recursos hídricos do Estado do Rio de Janeiro, pois está situado a montante da ETA Guandu a qual é responsável pelo abastecimento de água local e de 85% da população da RMRJ. Diante dos riscos potenciais de acidentes ambientais que podem atingir e comprometer a qualidade das águas desse trecho pode ser necessário o fechamento da captação, bem como a paralisação do bombeamento das águas do rio Paraíba do Sul para o rio Guandu e, conseqüentemente, a interrupção do fornecimento de água para cerca de 9 milhões de habitantes. Tais acidentes ambientais podem ser ocasionados tanto pela planta industrial presente nessa área, quanto pela atividade de transporte rodoviário de produtos perigosos, fabricados e/ou utilizados por essas indústrias, pois nesse trecho estão inseridas diversas rodovias.

Portanto, a ocorrência de acidentes com produtos químicos na área escolhida como unidade de estudo afetaria não somente o abastecimento de água dos usuários instalados, mas, principalmente, da RMRJ abastecida pela ETA Guandu, do mesmo

modo que afetaria os demais setores de usuários. Esse trecho possui destaque em diversos estudos diante de sua importância na preservação da qualidade e quantidade de água.

Nesse contexto, COSTA e ARAUJO (1980) desenvolveram um estudo com o apoio da FEEMA (atualmente INEA) abordando aspectos de situação de emergência, como a paralisação do bombeamento de água do rio Paraíba do Sul e consequente utilização do volume útil dos reservatórios como fonte de abastecimento. Foram realizados ainda estudos dos processos de dispersão no curso principal do rio Guandu para estimativa das concentrações de tóxico junto à tomada d'água para abastecimento no caso de acidente rodoviário junto a uma das travessias sobre o rio Guandu.

VIANA (2009) identificou os riscos de acidentes ambientais associados ao transporte terrestre de produtos perigosos em parte da área territorial de influência da Estação de Tratamento de Água do Guandu. Neste trabalho foram mapeados pontos de alta e média gravidade das principais rodovias e ferrovias situadas a montante da referida área de influência que podem comprometer a qualidade de água dos rios Paraíba do Sul e Guandu, identificando vários trechos de alto risco de acidentes ambientais ao longo da rodovia Presidente Dutra.

O trabalho de SILVA *et al.* (2009), através do monitoramento em diversos pontos dos rios que compõem a bacia do rio Guandu, situados entre o ponto em que ocorre a transposição do rio Paraíba do Sul até o ponto onde a ETA Guandu realiza a tomada de água para tratamento, permitiu a obtenção de amostras que representassem a qualidade desses diversos afluentes, possibilitando assim, avaliar os aspectos críticos da poluição na bacia do rio Guandu e sua influência sobre o abastecimento de água da população do Rio de Janeiro. Estudos semelhantes foram desenvolvidos por MALM *et al.* (1988 e 1989), onde foram determinadas as concentrações e o transporte de metais no sistema rio Paraíba do Sul – Guandu, avaliando o grau de impacto da poluição e os efeitos à saúde da população que vive na região.

Na Figura 5.3 está indicada a localização da área territorial, objeto desse estudo, bem como a delimitação da rede hidrográfica da região.

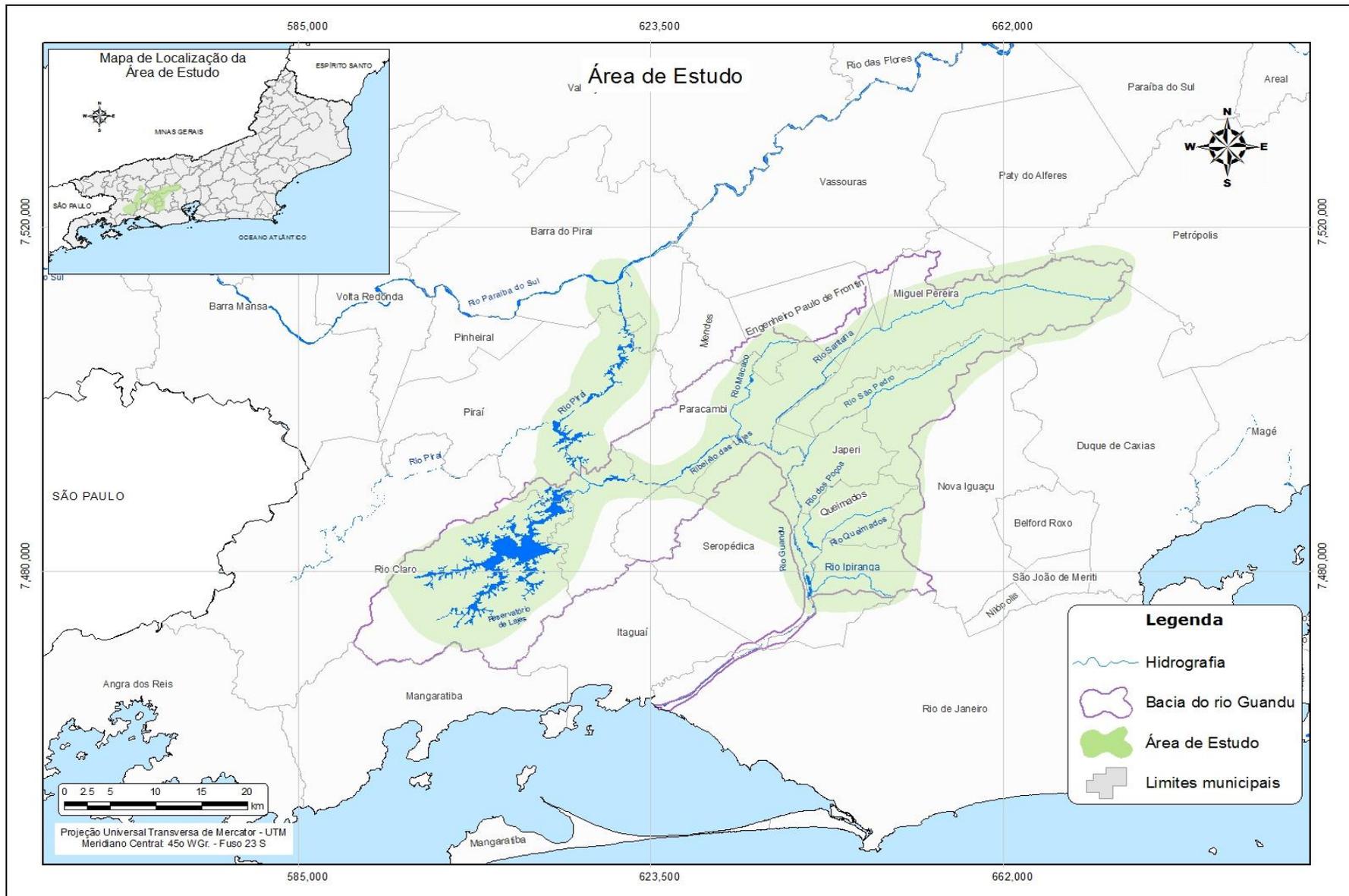


Figura 5.3 – Localização da área considerada no estudo.

## 5.2.2 Hidrografia Considerada

A hidrografia considerada no presente estudo compreende um trecho de curso d'água com extensão de aproximadamente 80 km, situado entre a estação elevatória de Santa Cecília e a captação da ETA Guandu (Figura 5.3). Neste trecho estão inseridos:

- Reservatório de Santana, situado entre as estações elevatórias de Santa Cecília e de Vigário, criado sobre o rio Piraí, que desvia suas águas para o rio Guandu por meio dos reservatórios de Tocos e Santana, e que tem seu curso invertido pela elevatória de Vigário;
- Reservatório de Vigário, entre a estação de bombeamento de Vigário e o canal de adução de Vigário;
- Tubulações sob pressão das adutoras das usinas hidroelétricas de Nilo Peçanha e Fontes;
- Reservatório de Ponte Coberta; e
- Longo trecho de rio em condições naturais que alterna regimes fortemente turbulentos e tranquilos, ou seja, Ribeirão das Lajes a jusante da Usina Hidrelétrica de Pereira Passos e rio Guandu até a ETA Guandu.

O rio Guandu é o principal manancial desse trecho, e tem como principais afluentes a montante da ETA, os rios Santana, São Pedro, Macacos, Ipiranga, Poços e Queimados. Esses, por sua vez, possuem influência direta na qualidade de suas águas, uma vez que afetados por alguma fonte de poluição acidental, atingem mais rapidamente o Guandu. No entanto, não será realizada a simulação de despejos acidentais de poluentes nesses cursos d'água, visto que ainda não foram realizados estudos referentes ao transporte e dispersão de poluentes, impossibilitando assim a aplicação do modelo proposto. Uma breve descrição dos cursos d'água selecionados para a aplicação da metodologia proposta será apresentado a seguir.

- Rio Piraí

O rio Piraí nasce no distrito de Lídice, município de rio Claro - RJ, e é afluente da margem direita do rio Paraíba do Sul, sendo de grande importância para o Estado do Rio de Janeiro, já que faz parte do Sistema-Light, onde 96% de suas águas são

utilizadas para abastecimento do Sistema Guandu, sendo ainda 20% utilizadas para geração de energia elétrica do município do Rio de Janeiro. Desta forma, juntamente com o rio Paraíba do sul tem suas águas transpostas para o rio Guandu. Dessa maneira, a qualidade de suas águas é de extrema relevância para a qualidade da água captada pela CEDAE na ETA Guandu.

- Ribeirão das Lajes

O Ribeirão das Lajes nasce na serra das Araras e possui uma bacia hidrográfica com aproximadamente 668 km<sup>2</sup>, sendo 326 km<sup>2</sup> área de captação da barragem da represa. Forma, na sua junção com o rio Santana, o rio Guandu que deságua na baía de Sepetiba. Sucessivamente ampliado do início do século até os anos sessenta, o potencial hidroenergético natural do Ribeirão das Lajes foi acrescido da derivação de descargas dos rios Paraíba do Sul e Piraí, tornando o trecho inferior do Ribeirão das Lajes um rio de descargas predominantemente desviadas de outras vertentes, com elevada permanência de vazões.

- Rio Guandu

O rio Guandu é o principal curso d'água da Baía de Sepetiba, drenando uma área de 1.385 km<sup>2</sup>, é responsável pelo abastecimento de água de grande parte da RMRJ, uma vez que é onde se localiza a maior ETA operada pela CEDAE. Tem como principais afluentes, os rios dos Macacos, Santana, São Pedro, Poços/Queimados e Ipiranga.

Desde a usina Pereira Passos até as barragens da CEDAE, percurso com cerca de 24 km, margeia as áreas urbanas de Japeri e Engenheiro Pedreira, situadas em sua margem esquerda, e mais abaixo, áreas do município de Seropédica.

Recebe pela margem esquerda o rio São Pedro, situado pouco abaixo do distrito de Japeri, caracterizado como um afluente em bom estado de conservação, mas cuja foz vem sendo degradada pela exploração de areia. A jusante da via Dutra, o curso do rio Guandu segue rumo sul margeando áreas de pastagem até a localidade urbana de Campo Lindo, no município de Seropédica, situada em correspondência com as barragens da CEDAE (ANA, 2006).

O rio Guandu divide-se em dois braços a montante da ponte da antiga estrada Rio - São Paulo, onde situa-se a ilha da CEDAE. Em ambos existem barragens

pertencentes à CEDAE, que constituem parte da estrutura de captação do sistema Guandu. Unida ao braço leste encontra-se a lagoa do Guandu, corpo d'água formado por uma das barragens da CEDAE. Nessa lagoa desembocam os rios dos Poços/Queimados e Ipiranga, ambos poluídos por esgotos domésticos, efluentes industriais e lixo.

A jusante da ilha da CEDAE, o rio Guandu atravessa um pequeno trecho, a seguir percorre cerca de 9 km até adentrar no canal de São Francisco, seguindo por 15 km até desaguar na baía de Sepetiba.

### 5.2.3 Qualidade das Águas

A qualidade das águas no trecho selecionado é influenciada diretamente pela qualidade das águas transpostas do rio Paraíba do Sul para o Sistema Guandu, e pela qualidade das águas da bacia do rio Guandu.

Para o monitoramento da qualidade de água da bacia hidrográfica do rio Guandu, o INEA conta com 10 estações de amostragem distribuídas nos principais afluentes da bacia. A Tabela 5.5 apresenta a média dos parâmetros monitorados pelo INEA na Bacia do rio Guandu para o período de 2006 a 2007.

Tabela 5.5 - Média dos parâmetros monitorados pelo INEA na bacia do rio Guandu para o período de 2006 a 2007.

Estação	Rios Monitorados	Parâmetros (Mediana dos valores monitorados no período de 2006-2007)						
		Condutividade ( $\mu_{mho}/cm$ )	DBO (mg/L)	Fósforo total (mg/L)	Nitrato (mg N/L)	Nitrato Amoniacal (mg N/L)	OD (mg/L)	Ortofosfato Dissolvido (mg/L)
IR 0251	Rio Ipiranga	380	9,0	1,5	0,02	2,43	1,0	1,25
CU 0650	Rio Cabuçu	405	9,5	1,5	0,04	2,55	1,7	1,15
GN 0200	Rio Guandu	86	2,0	0,1	0,35	0,30	8,0	0,05
GN 0201		90	2,0	0,1	0,35	0,06	8,8	0,03
MC 0410	Rio Macaco	180	3,4	0,4	0,3	1,00	4,0	0,15
LG 0351	Rio Ribeirão das Lajes	92	2,0	0,08	0,35	0,10	8,4	0,03
LG 0350		92	2,0	0,09	0,35	0,08	8,2	0,03
PO 0290	Rio dos Poços	220	6,0	1,0	0,05	2,20	1,8	0,5
QM 0270	Rio Queimados	380	16,0	1,5	0,03	2,60	1,0	0,9
QM 0271		460	20,0	1,5	0,04	2,60	0,8	1,2
Padrão CONAMA			<b>5</b>	<b>0,1</b>	<b>10</b>	<b>3,7</b>	<b>5</b>	

Fonte: INEA (2010)

Observa-se que alguns parâmetros monitorados estão acima do padrão da CONAMA 357/05, como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total e oxigênio dissolvido (OD). Entretanto, embora a poluição hídrica alcance níveis críticos em diversos afluentes do rio Guandu, as condições de qualidade de suas águas são adequadas tanto para o abastecimento de água quanto para os demais usos previstos para a Classe II<sup>3</sup>. Isso decorre da superioridade de sua vazão (artificial) em relação às vazões naturais de seus afluentes (SEMADS 1998).

De acordo com SERBER (2005), o aumento da poluição no rio Guandu está diretamente ligado à crescente poluição do rio Paraíba do Sul, ao crescimento industrial e populacional desordenado nos municípios pertencentes à bacia hidrográfica do rio Guandu, bem como pelos lançamentos de efluentes sanitários e industriais, depósitos clandestinos de resíduos sólidos e extração ilegal de areia, entre outros aspectos. Essa poluição é potencializada pelo encontro do rio Guandu com os rios Poços/Queimados e Cabuçu/Ipiranga, cujas águas estão bastante degradadas.

Diante da vulnerabilidade do sistema ETA-Guandu e da necessidade de um sistema de vigilância sobre a qualidade de água que atuasse também na detecção tanto de lançamentos contínuos, provenientes de atividades poluidoras, quanto de ocorrências episódicas, decorrentes de poluição por acidentes nas rodovias e ferrovias que margeiam o rio, a FEEMA (atualmente INEA) e a CEDAE implantaram uma estação de monitoramento automático que, aliado ao monitoramento convencional, permite unir frequência e abrangência, propiciando, conseqüentemente, outra dinâmica ao monitoramento realizado pela FEEMA e às ações operacionais executadas pela CEDAE (ANA, 2006).

Na estação de monitoramento automático do Guandu, são analisados os parâmetros OD, pH, Temperatura, Condutividade e TOC (carbono orgânico total). Essa estação é dotada, ainda, de um amostrador inteligente, que coleta alíquotas de hora em hora, por um período de 24 horas, desde que a observação de algum evento imponha a necessidade de uma avaliação em laboratório. Assim, esse monitoramento automático é de fundamental importância, pois permite uma avaliação contínua da qualidade da água, detectando alterações instantâneas e possibilitando agilizar as providências necessárias à solução do problema. Dessa forma, o monitoramento automático e o convencional

---

<sup>3</sup> Refere-se à classificação quanto ao uso das águas, onde na Classe II são destinadas: ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário; à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas; à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana. (VON SPERLING, 1998)

complementam-se ao reunir amplitude e frequência, imprimindo outra dinâmica ao monitoramento (Portal INEA, 2010). Através desse monitoramento automático no Guandu, seria possível estimar o local de possíveis acidentes ocorridos nesse corpo hídrico conforme o método a ser apresentado no Capítulo 6.

#### **5.2.4 Principais Usuários das Águas**

As águas do trecho escolhido como unidade de estudo são utilizadas para abastecimento público, geração de energia elétrica, beneficiamento de indústria, atividades de mineração, e ainda para diluição de efluentes. Vale ressaltar que os principais usuários desse trecho podem ser caracterizados como os beneficiários da transposição das águas do rio Paraíba do Sul através da elevatória de Santa Cecília, considerados, portanto, como usuários localizados na bacia do rio Guandu.

Nesse contexto a Tabela 5.6 apresenta a relação dos principais usuários e as respectivas vazões de captação e lançamento. Parte da água captada pelos usuários não retorna para a bacia hidrográfica, caracterizando um uso consuntivo<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Parte da água retirada é consumida durante seu uso. Exemplos: abastecimento, irrigação, entre outros.

Tabela 5.6 - Demandas de água cadastradas na Bacia do Rio Guandu.

Usuário	Vazão (m³/s)		Manancial	Corpo Receptor
	Vazão de Captação	Vazão de Lançamento		
CEDAE – Pirai	0,35	-	Res. Ribeirão das Lajes	Rio Pirai
CEDAE - Miguel Pereira	0,1	-	Rio Santana	Rio Santana
CEDAE - "Calha da CEDAE"	5,5	-	Ribeirão das Lajes	Fora da bacia
UTE Paracambi (Light)	0,4	0,1	Ribeirão das Lajes	Ribeirão das Lajes
El Paso	0,122	0,022	Rio Guandu	Rio Guandu
Eletrobolt	0,056	0,01	Rio Guandu	Rio Guandu
Duck Energy 3 Brasil	0,227	0,056	Rio Guandu	Rio Guandu
AMBEV	0,38	0,33	Rio Guandu	Rio Guandu
Cervejaria Kaiser S/A	0,2	0,16	Rio Guandu	Rio Guandu
CEDAE - ETA Guandu	45	-	Rio Guandu	Fora da bacia
Petrobrás – REDUC	0,5	-	Rio Guandu	Fora da bacia
Petroflex	0,08	-	Rio Guandu	Fora da bacia
Rio Polímeros	0,25	-	Rio Guandu	Fora da bacia
Termorio	0,44	-	Rio Guandu	Fora da bacia
Jolimode Roupas S/A	0,003	0,002	Rio Queimados	Rio Queimados
Inepar Energia	1,4	0,6	Canal de São Francisco	Fora da bacia
Fábrica Carioca de Catalizadores (FCC)	0,05	-	Canal de São Francisco	Fora da bacia
Gerdau / COSIGUA	3,47	-	Canal de São Francisco	Fora da bacia
UTE de Santa Cruz	0,04	-	Canal de São Francisco	Fora da bacia

Fonte: THOMAS E GONTIJO (2006) *apud* SERLA (2004).

Observa-se que a principal utilização das águas é para o setor de abastecimento, seguida pelo setor industrial. Possui como usuários em destaque a Light, responsável por gerar energia, e a CEDAE, responsável por abastecer cerca de 9 milhões de pessoas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Esse trecho escolhido para a aplicação da metodologia conta ainda com uma série de usinas que utilizam as águas para a geração de energia elétrica, as quais estão apresentadas na tabela abaixo:

Tabela 5.7- Usinas hidrelétricas situadas no trecho selecionado.

Denominação	Potência Efetiva MW	Início da Operação
Fontes Novas	132	1940
Nilo Peçanha	380	1953
Pereira Passos	100	1962

Fonte: CARVALHO *et al.* (2007).

É importante salientar que despejos acidentais de poluentes nos cursos d'água selecionados, provenientes do transporte de produtos perigosos, além de comprometer a qualidade das águas, prejudicam a captação dos usuários localizados na área de estudo. Adicionalmente, caso seja necessária a paralisação do bombeamento das águas do rio Paraíba do Sul para o Sistema Guandu, haverá comprometimento da geração de energia elétrica para o Estado do Rio de Janeiro.

### 5.2.5 Rodovias Inseridas na Área de Estudo

No trecho escolhido como unidade de estudo, há uma série de rodovias estaduais e federais que margeiam ou interceptam os corpos d'água a serem estudados os quais podem ser atingidos por substâncias perigosas caso haja algum acidente nessas rodovias. A área de estudo possui um pólo industrial significativo, com grandes indústrias, que potencializa a utilização dessas vias como rota de movimentação de produtos perigosos produzidos ou utilizados por essas indústrias.

No escopo deste trabalho, foram selecionadas as principais rodovias que cortam os corpos hídricos considerados na área de estudo através de mapas rodoviários (DNIT), e dos dados fornecidos pelo Laboratório de Hidrologia da COPPE/UFRJ. Assim foi possível verificar a presença de seis rodovias, sendo cinco estaduais e uma federal, as quais são apresentadas na Tabela 5.8 e indicadas na Figura 5.4.

Tabela 5.8 – Rodovias consideradas na área de estudo.

<b>Rodovia</b>	<b>Rios relacionados</b>
RJ - 125	Rios Guandu e Santana
RJ - 093	Rio São Pedro
RJ - 127	Rio dos Macacos
	Ribeirão das Lajes
RJ - 145	Rio Piraí
RJ - 105	Rio Ipiranga
BR - 116	Rio Queimados, Rio Guandu, Rio dos Poços e Ribeirão das Lajes

Vale ressaltar que as rodovias que cruzam o rio Paraíba do Sul também influenciam o trecho escolhido visto que, de acordo com estudos realizados por AMARAL (2009), uma vez ocorrido um despejo acidental nesse corpo hídrico, o poluente poderá atingir o rio Guandu, comprometendo assim a qualidade das águas deste manancial tão importante para o Estado do Rio de Janeiro.

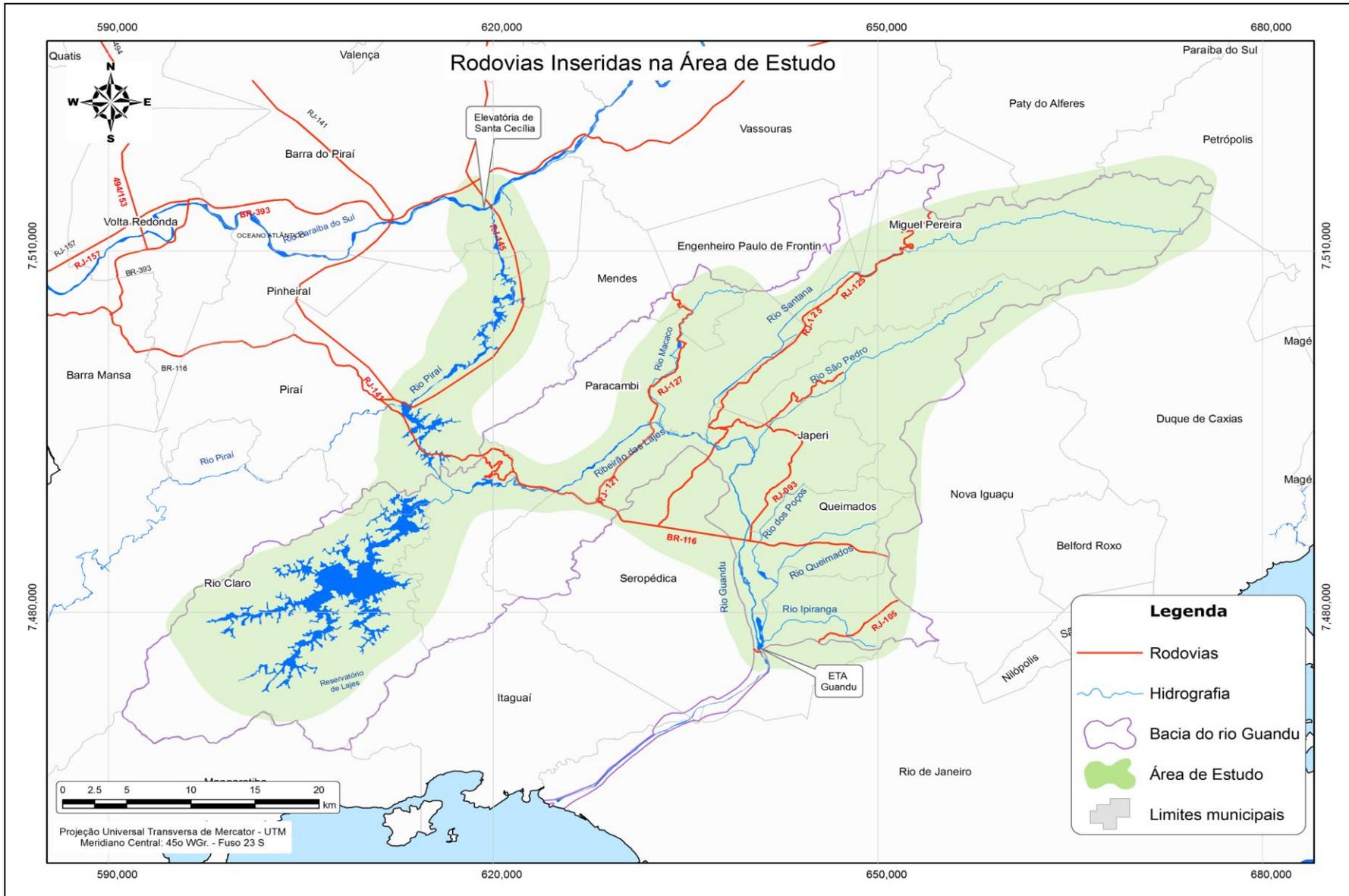


Figura 5.4 – Rodovias inseridas na área de estudo.

### **5.3 Cenários de Simulação**

Os cenários de simulação serão realizados para prever o tempo de trânsito da nuvem de poluentes a partir de um despejo como consequência de acidentes com produtos perigosos ocorridos nas rodovias selecionadas no presente estudo, bem como apresentar graficamente a distribuição temporal da concentração de poluentes, em um determinado local, a jusante do ponto do seu lançamento.

Visto que modelos matemáticos e programas computacionais têm sido cada vez mais utilizados como agentes facilitadores no suporte à decisão entre alternativas de gestão e uso dos recursos hídricos, um modelo de cálculo baseado em uma solução analítica será utilizado neste trabalho para a previsão do comportamento do poluente no trecho de curso d'água selecionado.

Neste contexto, o cálculo do transporte e dispersão dos poluentes, no presente estudo, será realizado através da fórmula de Taylor descrita na seção 4.3. Para a simulação proposta, será considerado o lançamento da carga de poluente no corpo hídrico de forma variável no tempo através da convolução de séries de dados de uma injeção instantânea obtida dos experimentos de campo e de características do acidente.

Dessa forma, diversos cenários podem ser simulados variando o ponto de despejo e captação, as condições hidrodinâmicas do rio, a quantidade de poluente, entre outros. No entanto, os cenários foram desenvolvidos de modo que pudessem retratar possíveis ocorrências na região em estudo.

Uma vez definida a área de estudo, é possível determinar os principais pontos críticos, ou seja, os possíveis locais de despejos acidentais de poluentes situados nas rodovias selecionadas, bem como os principais pontos de captação de água existentes, onde ambos serão utilizados para a simulação dos cenários.

A seguir, serão apresentados os pontos críticos e os pontos de captação de água considerados na área de estudo.

#### **5.3.1 Pontos Críticos Considerados na Área de Estudo**

No presente trabalho, foram considerados como pontos críticos de despejos acidentais de poluentes aqueles localizados nas rodovias que interceptam o corpo

hídrico principal ou seus afluentes, uma vez que esses podem ser atingidos mais rapidamente caso ocorra algum acidente envolvendo o transporte de substâncias perigosas. No entanto, vale ressaltar que, devido à imprevisibilidade de ocorrência dos acidentes rodoviários, qualquer ponto ao longo das rodovias pode ser considerado como possível local de despejo dessas substâncias.

Para auxiliar na determinação desses pontos críticos foi considerado ainda o estudo realizado por VIANA (2009), o qual identificou os riscos de acidentes ambientais associados ao transporte terrestre de produtos perigosos, baseado na gravidade do acidente referente à exposição dos corpos d'água inseridos na área de estudo, associada à frequência de ocorrência de acidentes por trechos das vias estudadas. Atribuindo assim gravidade alta para os trechos onde rodovias ou ferrovias cruzam o rio Guandu ou um de seus formadores (rio Santana e Ribeirão das Lajes), pois um acidente envolvendo o derramamento de produtos perigosos afetará diretamente a qualidade de suas águas. Já nos trechos onde os modais cruzam um dos afluentes primários do rio Guandu (Queimados, Ipiranga, Poços e São Pedro), ou, ainda, o rio Paraíba do Sul ou o rio Pirai, a gravidade foi considerada média, uma vez que a contaminação nestes corpos hídricos alcançaria rapidamente o rio Guandu. E por fim foi atribuída gravidade baixa trechos onde não há cruzamentos com nenhum dos corpos hídricos estudados, a gravidade foi considerada baixa, uma vez que o rio Guandu não estaria exposto à contaminação direta no caso de acidentes nesses trechos.

Desse modo, entre as rodovias identificadas na área de estudo, utilizadas como rota de produtos perigosos, a principal é a Via Dutra (BR-116), localizada entre dois dos mais importantes pólos industriais do país: Rio de Janeiro e São Paulo. A BR-116 intercepta o rio Guandu, principal curso d'água considerado nesse estudo, verificando-se ainda o cruzamento dessa rodovia com o rio Ribeirão das Lajes, principal formador do rio Guandu, e com os rios Poços e Queimados, afluentes do rio Guandu. O rio Ribeirão das Lajes é ainda atravessado pela RJ-127 no município de Paracambi e ainda cruza o rio dos Macacos no mesmo município. O rio Guandu é ainda interceptado pela RJ-125 no município de Japeri. A rodovia RJ-125 também atravessa o rio Santana, principal afluente do rio Guandu. Na Figura 5.5 estão indicados os pontos críticos citados na área de estudo, com destaque para os pontos onde as rodovias interceptam a calha principal do trecho a ser analisado.



Foi ainda identificado o cruzamento da RJ-105 e da RJ-093 com os rios Poços e São Pedro afluentes do rio Guandu. Já a RJ-145 atravessa o rio Piraí, que junto com o rio Paraíba do Sul, são considerados contribuintes do rio Guandu, pois tem parte de suas águas transportas para esse manancial.

Para efeito de modelagem, foram determinadas as distâncias dos possíveis locais de despejos de poluentes em decorrência de um acidente nas rodovias que interceptam o trecho considerado entre a estação elevatória de Santa Cecília e a captação da ETA Guandu. Na Tabela 5.9 estão apresentadas as distâncias desses possíveis locais de despejo acidental em relação à tomada d'água da Estação Elevatória de Santa Cecília em Barra do Piraí (seção S0), utilizada nos ensaios com traçadores no trecho realizados pelo Laboratório de Traçadores cujos resultados principais são apresentados na seção a seguir (COPPETEC, 1991; COPPETEC, 2003).

Tabela 5.9 - Distâncias dos possíveis locais de despejo acidental em relação a S0.

<b>Corpo Hídrico</b>	<b>Rodovia</b>	<b>Distância (km)</b>
Rio Piraí	RJ-145	10,0
Ribeirão das Lajes	BR 116 (Via Dutra)	43,9
	RJ-127	53,4
Rio Guandu	RJ - 125	59,5
	BR 116 (Via Dutra)	72,5

### **5.3.2 Pontos de Captação**

Neste estudo os pontos de captação foram considerados como as unidades que utilizam a água do corpo hídrico para o abastecimento e/ou beneficiamento de produtos, como as estações de tratamento de água e indústrias existentes ao longo do trecho. A presença de substâncias poluidoras na água além de comprometer a saúde da população, bem como o meio ambiente, resulta em prejuízos econômicos.

A Tabela 5.10 apresenta as distâncias de diversos pontos de captação existentes no trecho em estudo em relação à tomada d'água da Estação Elevatória de Santa Cecília em Barra do Piraí, ou seja, a seção 0 (S0) dos ensaios de traçadores realizados pelo Laboratório de Traçadores (COPPETEC, 1991; COPPETEC, 2003).

Tabela 5.10 - Distâncias de possíveis locais de captação em relação a S0.

Usuário	Manancial	Distância (km)
El Paso	Rio Guandu	42,1
UTE Paracambi (Light)	Ribeirão das Lajes	50,9
Duck Energy 3 Brasil	Rio Guandu	56,3
Eletrobolt	Rio Guandu	72,5
Petrobrás - REDUC	Rio Guandu	82,3
Petroflex	Rio Guandu	82,3
Rio Polímeros	Rio Guandu	82,3
Termorio	Rio Guandu	82,3
CEDAE - ETA Guandu	Rio Guandu	82,6

## 5.4 Uso de Traçadores na Obtenção de Parâmetros para o Modelo Matemático

Este capítulo tem como objetivo descrever os ensaios de traçadores realizados pelo Laboratório de Traçadores (COPPETEC, 1991; COPPETEC, 2003), a fim de obter os parâmetros de transporte e dispersão que serão utilizados para a simulação dos cenários.

### 5.4.1 Ensaios de Campo

Na área delimitada como unidade de estudo, foram realizadas duas campanhas com traçadores a fim de obter *in situ* resultados referentes às velocidades médias ( $U$ ), tempos de trânsito e coeficientes de dispersão ( $D_L$ ), ou seja, os parâmetros de transporte e dispersão no trecho entre a Elevatória de Santa Cecília, no rio Paraíba do Sul e a ETA Guandu, no rio Guandu. Salienta-se que a determinação de  $U$  e  $D_L$  utilizando-se traçador em condições naturais de escoamento evita as imprecisões decorrentes do uso de fórmulas empíricas. O monitoramento foi realizado pela equipe do Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ e a seguir será realizada uma breve descrição dos ensaios.

- **1ª Campanha de Traçadores**

Foi realizada no período entre 26/02/1991 e 01/03/1991 o primeiro ensaio de campo com uso de traçadores no trecho estudado com o objetivo de determinar *in situ* os parâmetros de transporte e dispersão.

O ponto inicial do monitoramento encontra-se na tomada d'água da estação elevatória de Santa Cecília, enquanto o ponto final localiza-se na ETA Guandu. Devido a sua extensão, o trecho foi dividido em quatro subtrechos para a realização do ensaio, e as injeções de traçador foram realizadas na seção montante de cada um desses subtrechos, ao longo dos quais foram estabelecidas várias seções de monitoramento. Procurou-se coincidir as seções desse ensaio com as seções de monitoramento de qualidade de água utilizadas pela FEEMA (atualmente INEA). Na Tabela 5.11 estão apresentadas as características das seções de monitoramento do ensaio realizado cuja localização está indicada na Figura 5.6.

Tabela 5.11 - Distâncias entre as seções de injeção e monitoramento.

Nº	Seção	Distância à seção anterior (km)	Distância à Sta. Cecília (km)	Localização
0	SC-200	0,0	0,0	Tomada d'água da Usina Elevatória de Santa Cecília (Barra do Piraí)
1	SN-218	5,8	5,8	Final do Canal de Santa Cecília (Barra do Piraí)
2	SC-229 A	10,3	16,1	Meio do Reservatório de Santana entre Barra do Piraí e Piraí
3	VG-610 A	8,0	24,1	Tomada d'água da Usina Elevatória Vigário (Piraí)
4	VG-370	7,5	31,6	Canal de adução de Vigário (Piraí)
5	VG-370 A	1,8	33,4	Canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Nilo Peçanha
6	LG-350 A	4,7	38,1	Canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Pereira Passos
7	LG-351	5,8	43,9	Ponte na Via Dutra sobre o Ribeirão das Lages
8	LG-352	9,5	53,4	Ponte sobre o Ribeirão das Lages em Paracambi
9	GN-201	6,1	59,5	Ponte sobre o rio Guandu em Japeri
10	GN-202	13,0	72,5	Ponte na Via Dutra sobre o rio Guandu
11	GN-200	10,1	82,6	ETA do rio Guandu (CEDAE)

Fonte: COPPETEC (1991).

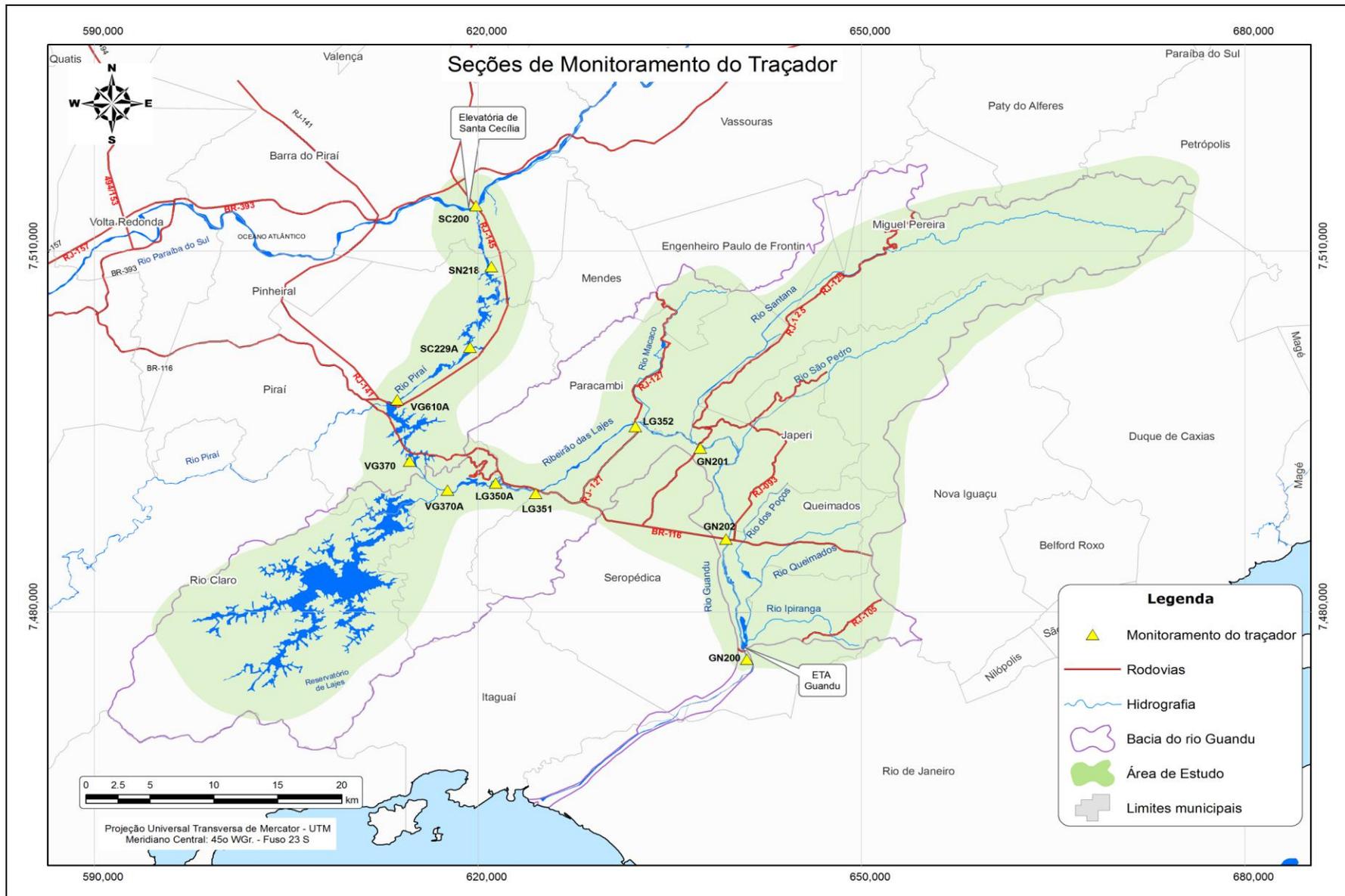


Figura 5.6 - Localização das seções de monitoramento de traçador na primeira campanha.

O corante fluorescente utilizado foi a Fluoresceína Sódica ou Uranina e as injeções ocorreram sempre de forma instantânea. A Tabela 5.12 apresenta os dados relativos à injeção do traçador.

Tabela 5.12 - Dados relativos a injeção do traçador.

<b>Nº</b>	<b>Seção de Injeção</b>	<b>Subtrecho</b>	<b>Data/Hora da Injeção</b>	<b>Traçador</b>	<b>Massa (kg)</b>
1	SC 200	Reservatório de Santana	28/02/1991- 9:00h	Uranina	3,0
2	VG 610 A	Reservatório de Vigário	27/02/1991- 8:05h	Uranina	14,8
3	VG 370	Reservatório de Ponte Coberta	26/02/1991- 9:10h	Uranina	15,0
4	LG 350A	Ribeirão das Lajes e Guandu	26/02/1991- 8:20h	Uranina	2,8

Fonte: COPPETEC (1991).

Embora este ensaio tenha sido realizado há 20 anos, os dados obtidos podem ser utilizados, pois o trecho onde foi realizada a campanha apresenta ainda as mesmas características hidrodinâmicas.

- **2ª Campanha de Traçadores**

A segunda campanha de campo foi realizada no período de 25/06/2003 a 02/08/2003, em parte do trecho a ser estudado, com uso de traçadores fluorescentes para determinar experimentalmente as características de transporte e dispersão em condições de vazões de estiagem para o rio Guandu.

Nessa campanha o ponto inicial de monitoramento foi o canal de fuga da Usina de Pereira Passos e o ponto final na ETA do Guandu, optando-se por dividir esse trecho, de aproximadamente de 45 km em dois subtrechos. O primeiro subtrecho, com extensão de aproximadamente 21,5 km, inicia-se imediatamente a jusante da Usina de Pereira Passos (LIGHT S.A.) e termina na ponte urbana existente na cidade de Japeri (RJ). O segundo subtrecho, com extensão de aproximadamente 23,6 km, inicia-se na ponte da cidade de Japeri (RJ) terminando na tomada d'água da barragem da ETA Guandu (operada pela CEDAE-RJ). A Tabela 5.13 apresenta as características das seções de injeção e monitoramento do ensaio realizado cuja localização está indicada na Figura 5.7.

Tabela 5.13 - Distâncias entre as seções de injeção e monitoramento.

Nº	Seção	Distância à seção anterior (km)	Distância à UHE Pereira Passos (km)	Localização
0	LG-350A	0	0	U.H.E. Pereira Passos
1	LG-351	5,5	5,5	Ponte na Via Dutra sobre o Ribeirão das Lajes
2	LG-352	9,9	15,4	Ponte sobre o Ribeirão das Lages em Paracambi
3	GN-201	6,1	21,5	Ponte sobre o rio Guandu em Japeri
4	GN-202	13,5	35,0	Ponte na Via Dutra sobre o rio Guandu
5	GN-200	10,1	45,1	ETA do rio Guandu (CEDAE)

Fonte: COPPETEC (2003)



Foram realizadas duas injeções de traçador fluorescente no rio Guandu visando à determinação experimental de suas características de transporte e de diluição em estiagem. Para isso, foi utilizado o corante Amidorondamina G, também conhecido por “Acid Red 50”, substância conservativa e altamente solúvel em água. A injeção deste corante ocorreu sempre de forma instantânea no corpo hídrico. Na Tabela 5.14 são apresentados os dados das duas injeções realizadas no rio Guandu e na Tabela 5.15 é apresentada a síntese dos resultados obtidos nessa campanha.

Tabela 5.14 - Dados das injeções de traçador fluorescente nos ensaios no rio Guandu.

Nº	Seção de Injeção	Subtrecho	Data/hora da injeção	Massa de traçador (kg)	Vazão (m³/s)
1	LG-350A	Jusante UHE Pereira Passos	25/06/2003- 06:15 h	3	129
2	GN-201	Ponte na RJ-125 em Japeri	02/08/2003- 07:40 h	2	129

Fonte: COPPETEC (2003)

Tabela 5.15 – Síntese dos resultados obtidos na segunda campanha de campo com traçadores.

Nº	Seção	Distância à injeção (km)	$U$ (m/s)	$D_L$ (m²/s)	$Q$ (m³/s)
1	LG351	5,5	0,93	58	129
2	LG352	15,4	0,87	72	129
3	GN201	21,5	0,77	65	129
4	GN202	13,5	0,50	20	129
5	GN200	23,6	0,35	55	129

Fonte: COPPETEC (2003)

#### 5.4.2 Análise dos Resultados dos Ensaios de Campo

Durante os ensaios de campo a equipe técnica do laboratório realizou coletas de amostras com intervalos de tempos determinados em função da distância da seção de monitoramento à seção de injeção no subtrecho. Após cada coleta, as amostras foram transferidas para frascos devidamente identificados (local e hora) e acondicionados de modo a proteger as amostras contra eventual fotodecaimento e, levadas para o Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ.

No laboratório todas as amostras coletadas nas seções de monitoramento foram reanalisadas espectrofluorimetricamente de modo a se obter uma determinação mais precisa de suas concentrações. O produto final é um gráfico que relaciona as intensidades de fluorescência emitidas pela amostra de água, no eixo das ordenadas e, o comprimento de onda

característico no eixo das abscissas, onde o valor da intensidade máxima de fluorescência é proporcional à concentração de traçador contido na amostra analisada. Assim é possível determinar uma reta de calibração relacionando os valores das concentrações conhecidas com os valores máximos de intensidade de fluorescência.

A partir da reta de calibração e das análises espectrofluorimétricas das amostras coletadas em diferentes tempos foram construídas as “curvas de passagem” (variação da concentração de traçador em relação ao tempo) para cada seção de monitoramento (BENISCHKE, 1989). Assim, a partir das curvas de passagem de traçador nas seções de monitoramento, os valores de velocidade média de trânsito ( $U$ ) e coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ) foram obtidos através do modelo de Taylor.

Nesse método, também conhecido como método de ajuste, o coeficiente de dispersão longitudinal obtido com traçadores é determinado pelo ajuste entre a curva da distribuição experimental de concentrações versus tempo, obtida *in situ* para uma dada seção de monitoramento, e a curva gerada pelo modelo de Taylor. Ou seja, consiste em variar os valores de  $D_L$  e  $U$  na Equação (4.10) e comparar a concentração obtida com aquela medida *in situ* com traçadores nas seções de controle. O melhor ajuste entre a distribuição teórica e a medida quantifica, para as condições hidrodinâmicas, o valor do coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ) e da velocidade média ( $U$ ). As demais variáveis da equação ( $M$ ,  $x$ ,  $S$  e  $t$ ) são conhecidas.

## 6 CENÁRIOS DESENVOLVIDOS

Os cenários de simulação foram propostos visando apresentar situações futuras criadas com possíveis acidentes para apoiar tomadas de decisões no presente, estimando a variação no espaço e no tempo da concentração de substâncias solúveis e conservativas derramadas no corpo hídrico de interesse.

Uma vez que é possível variar os locais de despejo e captação, bem como as condições hidrodinâmicas do rio, entre outras variáveis do modelo utilizado, podem-se construir diferentes cenários de estudo. Neste trabalho, buscou-se a simulação de acidentes que permitissem retratar os possíveis acidentes na região. Para auxiliar no desenvolvimento dos cenários, foram identificados os acidentes já ocorridos na área de estudo junto ao SOPEA/INEA, responsável pelo atendimento aos acidentes ambientais no Estado do Rio de Janeiro.

Foram propostos três cenários para a simulação do transporte do poluente no trecho selecionado como área de estudo, os quais foram simulados com comportamento hidráulico distinto e com variações nas características do acidente, para analisar o comportamento das curvas de passagem do poluente ao longo das captações consideradas no trecho em estudo. Neste trabalho, os tempos de início e fim da curva de passagem do poluente simulado foram considerados como sendo os tempos associados às curvas que representavam valores superiores a  $0,01 \text{ mg/m}^3$  da concentração na seção considerada. Os parâmetros de transporte e dispersão no trecho de curso d'água selecionado utilizados como parâmetros de entrada no modelo de Taylor, foram determinados por ensaios com traçadores realizados pelo Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ já detalhados anteriormente (COPPETEC, 1991; COPPETEC, 2003). A seguir serão descritos os cenários desenvolvidos.

## 6.1 Cenário I

Para o primeiro cenário será considerado o lançamento instantâneo de massa unitária (massa=1 kg), com o objetivo de representar a resposta impulsional das seções de monitoramento do traçador, ou seja, o resultado do ensaio com traçador no trecho estudado. Para isso foi realizada a normalização das curvas de passagem do traçador, definida pela divisão da concentração  $C(t)$  pela área da curva de resposta (isto é, área sob a curva  $C$  versus  $t$ ), conforme descrita pela equação 4.9 apresentada na metodologia desse trabalho.

Esse cenário foi escolhido para determinar o tempo envolvido em um acidente que atingirá todo o sistema fluvial em análise, ou seja, um lançamento em Santa Cecília com observações passando pelo sistema Guandu até a ETA do Guandu. A síntese dos parâmetros de transporte e dispersão de poluentes determinados no ensaio com traçadores para as seções monitoradas ao longo de todo o trecho em estudo, a partir de quatro injeções conforme descrito na seção 5.4 e utilizados para a simulação desse cenário, é apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Síntese dos resultados obtidos no ensaio com traçadores.

Subtrecho	Seção	Distância da seção de injeção (km)	Parâmetros	
			$U$ (m/s)	$D_L$ (m <sup>2</sup> /s)
Reservatório de Santana	SN-218	5,8	2,52	40
	SC-229A	16,1	0,74	44
	VG-610A	24,1	0,69	50
Reservatório de Vigário	VG-370	8,0	0,08	11
Reservatório de Ponte Coberta	VG-370A	1,8	1,50	7
	LG-350A	6,5	0,09	40
Ribeirão das Lajes e Rio Guandu	LG-351	5,8	0,92	44
	LG-352	15,3	0,94	53
	GN-201	21,4	0,89	57
	GN-202	34,4	0,80	64
	GN-200	44,5	0,70	65

Fonte: COPPETEC (1991)

Vale ressaltar que os valores de vazões líquidas, velocidade média do escoamento e coeficiente de dispersão longitudinal, medidos através do emprego do traçador fluorescente, são valores médios representativos entre o local de injeção e a seção em questão, não devendo ser confundidos com os valores médios correspondentes a uma dada seção de monitoramento. As condições hidráulicas durante os ensaios com traçadores estão indicadas em anexo. As

curvas de passagem que representam a resposta impulsional do traçador a uma injeção instantânea de massa unitária nas seções de monitoramento em cada subtrecho estão apresentadas no apêndice deste trabalho.

Com o objetivo de determinar o comportamento das curvas de passagem do traçador, considerando uma única injeção para todo o trecho, foi aplicada a técnica da convolução nas curvas medidas e normalizadas em cada subtrecho. Assim, foi possível determinar os tempos característicos das curvas de passagem do traçador, possibilitando avaliar as medidas emergenciais a serem tomadas em caso de acidentes nesse trecho.

Nessas condições, de injeção instantânea de um poluente conservativo de massa unitária (massa=1 kg), as curvas de passagem para as diferentes seções situadas a jusante do ponto de lançamento estão indicadas na Figura 6.1, as quais foram ajustadas a partir dos ensaios de campo. Na Figura 6.2 e na Figura 6.3, as curvas de passagem estão indicadas separadamente para melhor visualização.

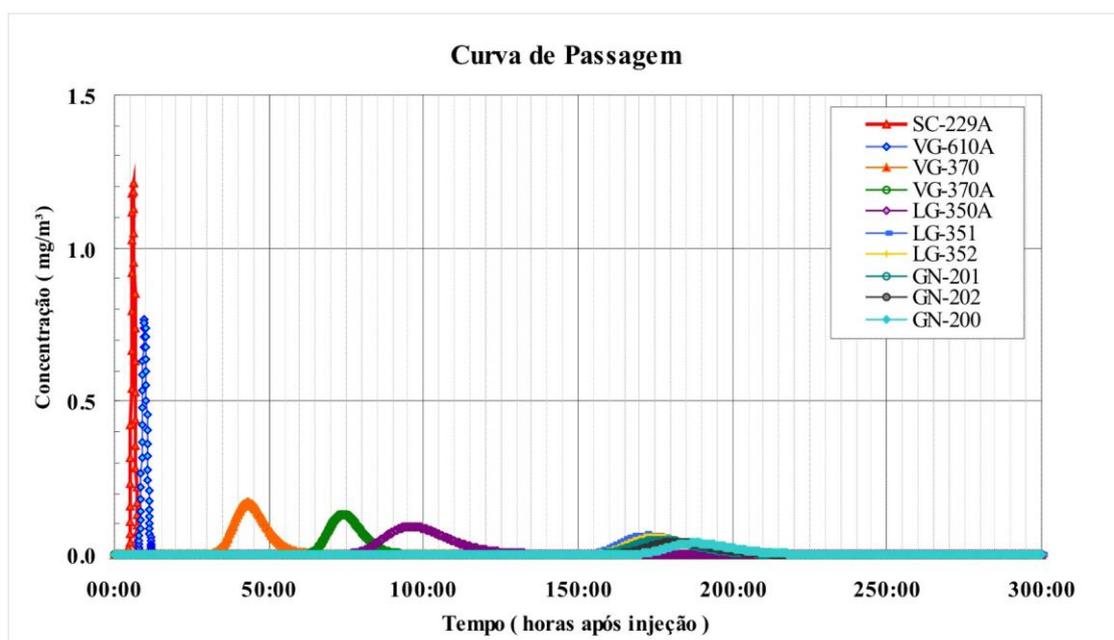


Figura 6.1 - Curvas de passagem do poluente nas seções de monitoramento em todo o trecho.

Foi considerado neste cenário o lançamento do poluente próximo da estação elevatória de Santa Cecília localizada a 82,6 km da captação da ETA Guandu. Contudo a primeira seção de monitoramento (SN-218) localizada a 5,8 km da seção de injeção foi desconsiderada, pois não foi avaliado se nessa distância já havia ocorrido à mistura transversal completa do

traçador no corpo hídrico, condição necessária para a aplicação do modelo utilizado na determinação dos parâmetros de transporte e dispersão.

As curvas apresentadas na Figura 6.2 representam as seções de monitoramento denominadas SC-229 A e VG-610 A, situadas no Reservatório de Santana entre Barra do Piraí e Piraí, e na tomada d'água da Usina Elevatória de Vigário em Piraí, localizadas a 16,1 km e 24,1 km do ponto de lançamento do poluente, respectivamente.

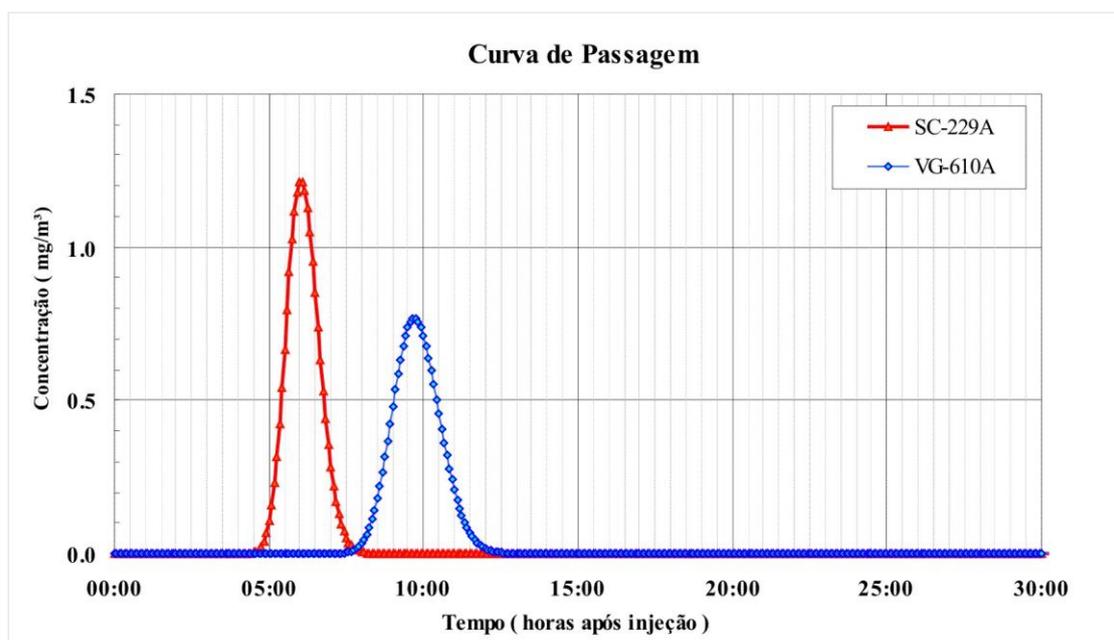


Figura 6.2 - Curvas de passagem de traçador nas seções SC-229 A e VG-610 A.

Na Figura 6.3 estão representadas as curvas de passagem nas seções monitoradas localizadas: no canal de adução de Vigário em Piraí (VG-370); no canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Nilo Peçanha (VG-370 A); no canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Pereira Passos (LG-350 A); na ponte na Via Dutra sobre o Ribeirão das Lajes (LG-351); na ponte sobre o Ribeirão das Lajes em Paracambi (LG-352); na ponte na RJ-125 sobre o rio Guandu em Japeri (GN-201); na ponte na Via Dutra sobre o rio Guandu (GN-201); e na ETA do rio Guandu (GN-200). Estas seções estão situadas respectivamente a 31,6 km, 33,4 km, 38,1 km, 43,9 km, 53,4 km, 59,5 km, 72,5 km e 82,6 km da seção de lançamento localizada próximo a estação elevatória de Santa Cecília.

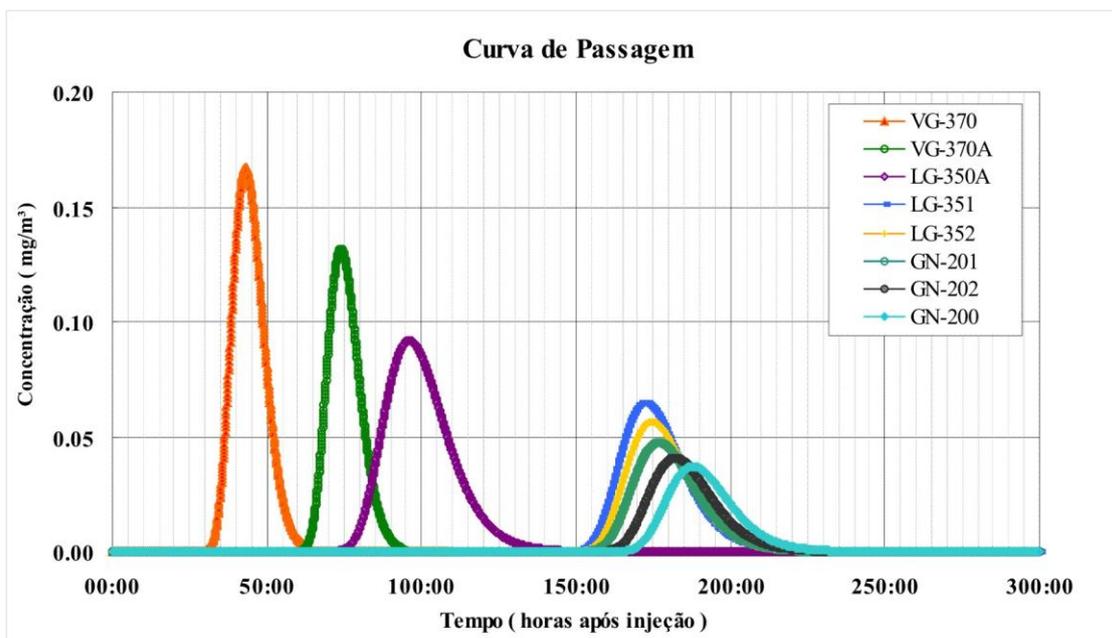


Figura 6.3 - Curvas de passagem de traçador nas seções VG-370, VG-370 A, LG-350 A, LG-351, LG-352, GN-201, GN-202 e GN-200.

A partir da análise dessas figuras, observa-se que a concentração máxima do poluente atingida foi de 1,21 mg/m<sup>3</sup> após aproximadamente 6 horas do derramamento na seção localizada a 16,1 km do local do acidente, considerado para este cenário a pior situação para as seções observadas. O poluente lançado leva cerca de 210 horas (aproximadamente 9 dias) para passar por todo o trecho considerado, ou seja, da estação elevatória de Santa Cecília até a captação da ETA Guandu, o que possibilita, caso ocorra um acidente, que medidas emergenciais sejam tomadas a tempo.

Além disso, é possível verificar que quanto mais próximo o ponto de lançamento é da seção de monitoramento, maior é o valor máximo de concentração. Do mesmo modo, os picos das concentrações diminuem quanto mais distante do ponto de despejo do poluente. No entanto, o tempo de passagem da pluma de poluente é maior, fazendo com que o poluente permaneça por mais tempo na seção em análise. A síntese dos resultados obtidos neste cenário está apresentada na Tabela 6.2, destacando o tempo inicial, final e de passagem total da pluma do poluente nas seções monitoradas.

Tabela 6.2 – Resultados da simulação do cenário de massa unitária nas seções monitoradas em todo o trecho.

Seção	Distância (km)	Conc. Máxima (mg/m <sup>3</sup> )	Tempo Início (h)	Tempo Final (h)	Tempo de Passagem da Curva (h)
SC-229A	16,1	1,21	04:35	08:00	03:25
VG-610A	24,1	0,77	07:40	12:20	04:40
VG-370	31,6	0,17	32:40	60:10	27:30
VG-370A	33,4	0,13	63:45	90:15	26:30
LG-350A	38,1	0,09	78:10	128:20	50:10
LG-351	43,9	0,06	154:55	201:30	46:35
LG-352	53,4	0,06	157:55	203:10	45:15
GN-201	59,5	0,05	160:35	204:00	43:25
GN-202	72,5	0,04	166:15	208:05	41:50
GN200	82,6	0,04	172:15	213:10	40:55

Os resultados desse cenário permitiram descrever o comportamento da pluma de um poluente em diferentes seções após o lançamento instantâneo próximo a estação elevatória de Santa Cecília. Auxiliam assim, a tomada de medidas emergenciais adequadas caso ocorra um derramamento nesse trecho uma vez conhecido os tempos de início e fim da curva de passagem para cada seção. Por representarem respostas impulsivas, permitem ainda a realização de outros cenários de simulação variando as características dos acidentes.

## 6.2 Cenário II

Nesse cenário objetivou-se simular os efeitos de um despejo acidental de um poluente solúvel e conservativo em quatro seções distintas do trecho em estudo que representam os pontos de captação da Usina Termelétrica de Paracambi, Duke Energy Brasil, Eletrobolt e, ETA Guandu e que se localizam, respectivamente, a 12,8 km, 18,2 km, 35 km e, 45,1 km em relação à Usina Hidrelétrica de Pereira Passos, correspondente a seção de injeção dos ensaios *in situ* com traçadores realizados no rio Guandu em 2003 pelo Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ.

Embora as termelétricas utilizem a água para o sistema de resfriamento, necessária para a condensação do vapor de exaustão das turbinas, dependendo da qualidade química da água utilizada pode acelerar a corrosão das partes metálicas, como por exemplo, a presença de agentes incrustantes e corrosivos tais como: carbonatos, dureza (cálcio e magnésio), cloretos, ferros, silicatos, gases dissolvidos, entre outros. O pH da água também é um fator que

influencia na corrosão das peças metálicas da termelétrica, e que pode ser alterado por algum produto químico derramado no corpo hídrico.

O ponto de despejo considerado neste cenário foi um acidente ocorrido na BR-116, próximo à Usina Hidrelétrica de Pereira Passos com vazamento do poluente para o rio Ribeirão das Lajes, onde uma massa igual a 1 tonelada (massa=1000 kg) foi lançada de modo contínuo por cerca de 4 horas. Para descrever o comportamento da massa despejada no tempo (Figura 6.4), utilizou-se a distribuição Gaussiana, com os parâmetros ajustados de forma empírica obedecendo à quantidade pré-determinada de massa despejada, já que não se possui informações reais do possível acidente.

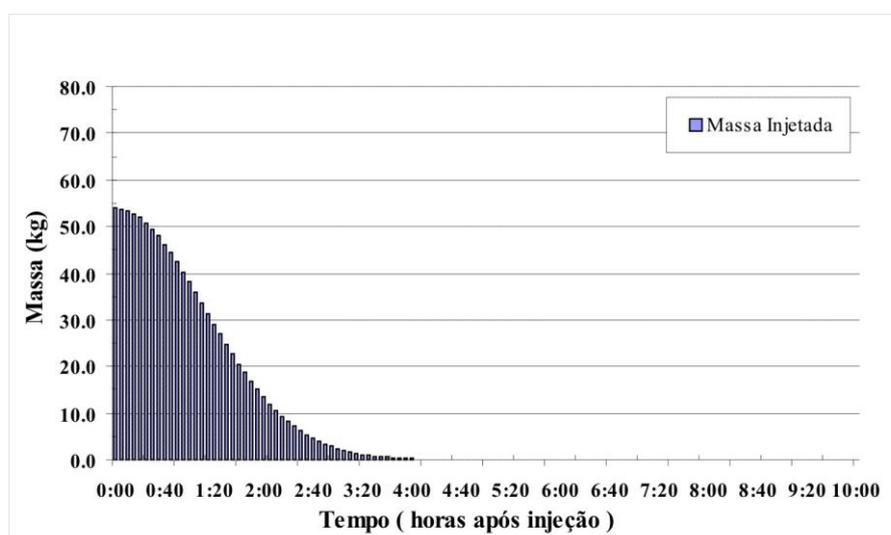


Figura 6.4 - Representação da distribuição da massa em função do tempo.

A determinação das concentrações do poluente nas quatro seções distintas ao longo do tempo foi realizada através do modelo de Taylor. Os parâmetros de transporte e dispersão de poluentes utilizados, para a simulação deste cenário, foram os determinados no ensaio com traçadores realizado em 2003, descrito na seção 5.4, onde houve pouca variação de vazão quando comparado com o ensaio em 1991. Para a simulação do lançamento contínuo do poluente no corpo hídrico foi utilizada a técnica da convolução entre as curvas de passagem do poluente nas diferentes seções obtidas pelo modelo e a distribuição da massa despejada no corpo hídrico. Para este cenário foram ainda consideradas três situações de vazão: mínima, média e máxima.

Os valores típicos de vazão para este trecho, correspondente ao rio Guandu, foram determinados a partir da série de vazões médias diárias do posto fluviométrico UHE Pereira

Passos Jusante (Código Light: V-3-489) para o período 2005 a 2010 e que correspondem a 120 m<sup>3</sup>/s, 160 m<sup>3</sup>/s e 240 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, conforme apresentado na Figura 6.5. Não foram consideradas as contribuições da própria bacia do rio Guandu, pois os cursos d'água que lá se desenvolvem são desprovidos de observações fluviométricas confiáveis e de longa duração.

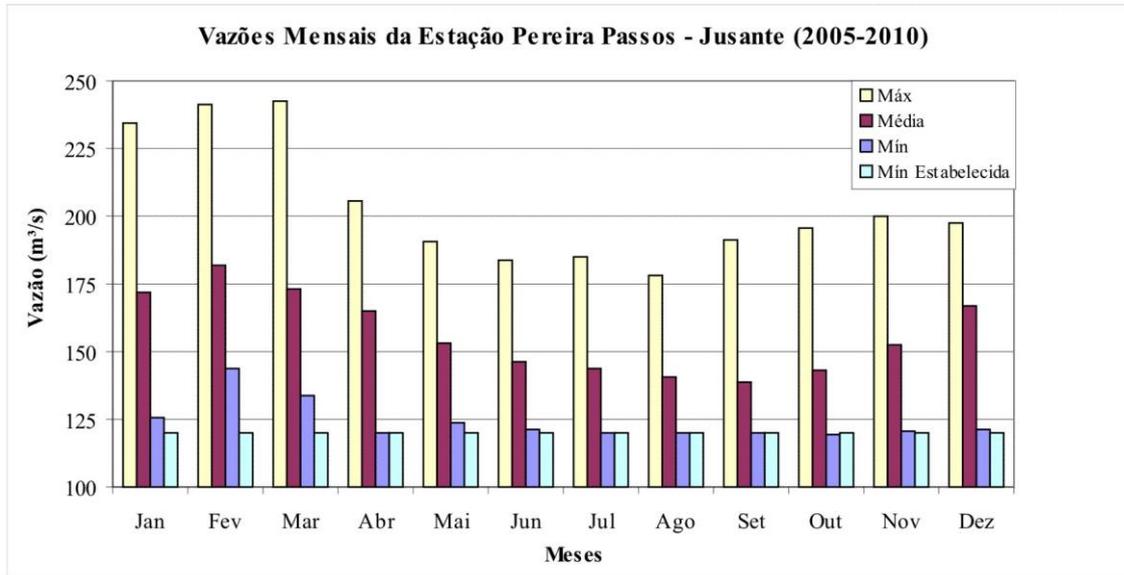


Figura 6.5 - Histograma das vazões mensais máximas, médias e mínimas no período de 2005 a 2010.

Nessas condições de vazões típicas e variação da distribuição da massa do poluente lançada, as curvas de passagem do poluente para as diferentes seções situadas a jusante do ponto de despejo são apresentadas na Figura 6.6.

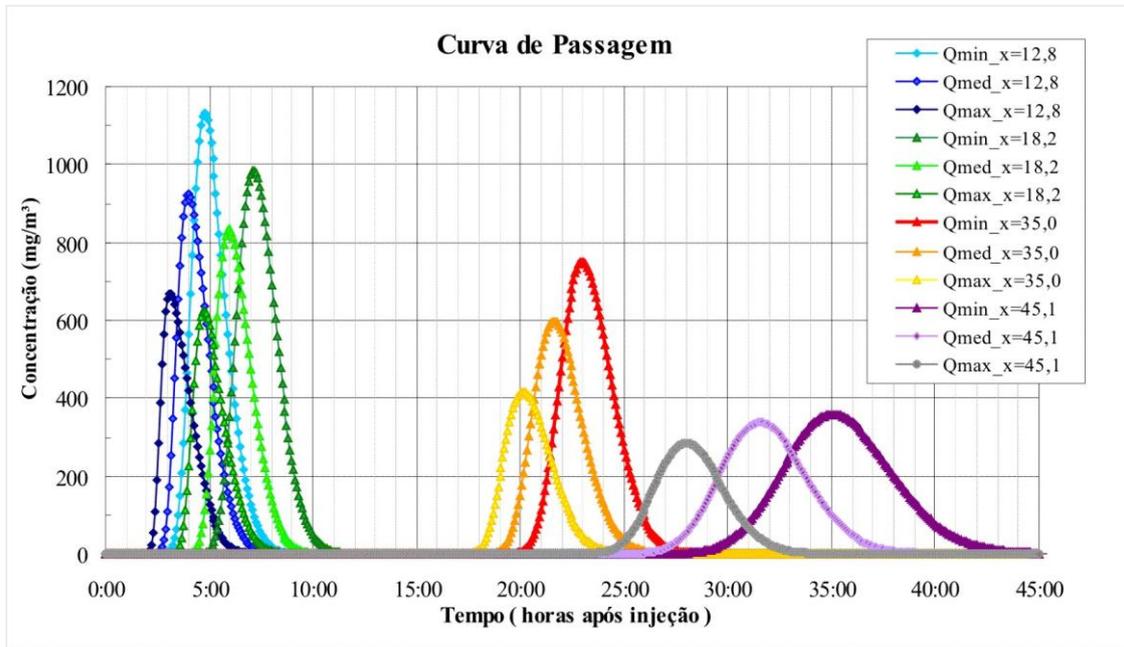


Figura 6.6 - Curva de passagem para todas as vazões nas diferentes distâncias.

As curvas que representam a captação da ETA Guandu, com distância considerada de 45,1 km ao ponto de despejo, também estão associadas aos usuários: Petrobrás (Reduc), Rio Polímeros, Termorio e Petroflex, pois as captações dessas indústrias estão localizadas próximas a ETA Guandu. Na Figura 6.7, na Figura 6.8 e na Figura 6.9 são apresentadas as curvas de passagem para as vazões mínima, média e máxima separadamente. Uma síntese dos principais resultados obtidos no cenário simulado com a metodologia proposta nesse estudo está apresentada na Tabela 6.3.

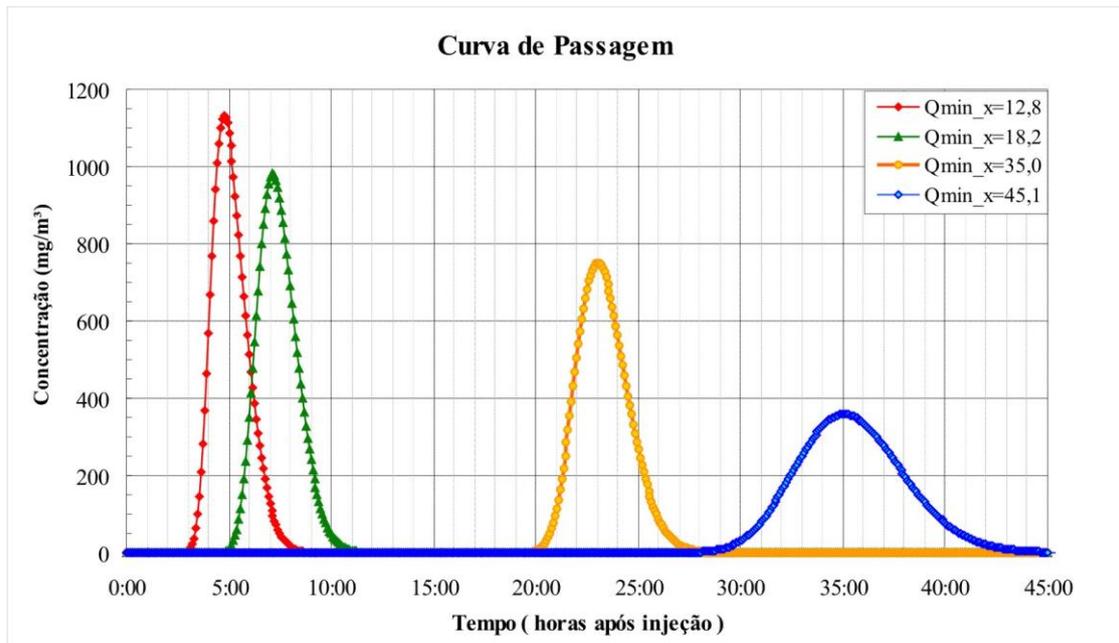


Figura 6.7 - Curvas de passagem para a situação de vazão mínima ( $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ) nas diferentes seções de captação (Usina Termelétrica de Paracambi – 12,8 km; Duke Energy Brasil – 18,2 km; Eletrobolt – 35 km; ETA Guandu – 45,1 km).

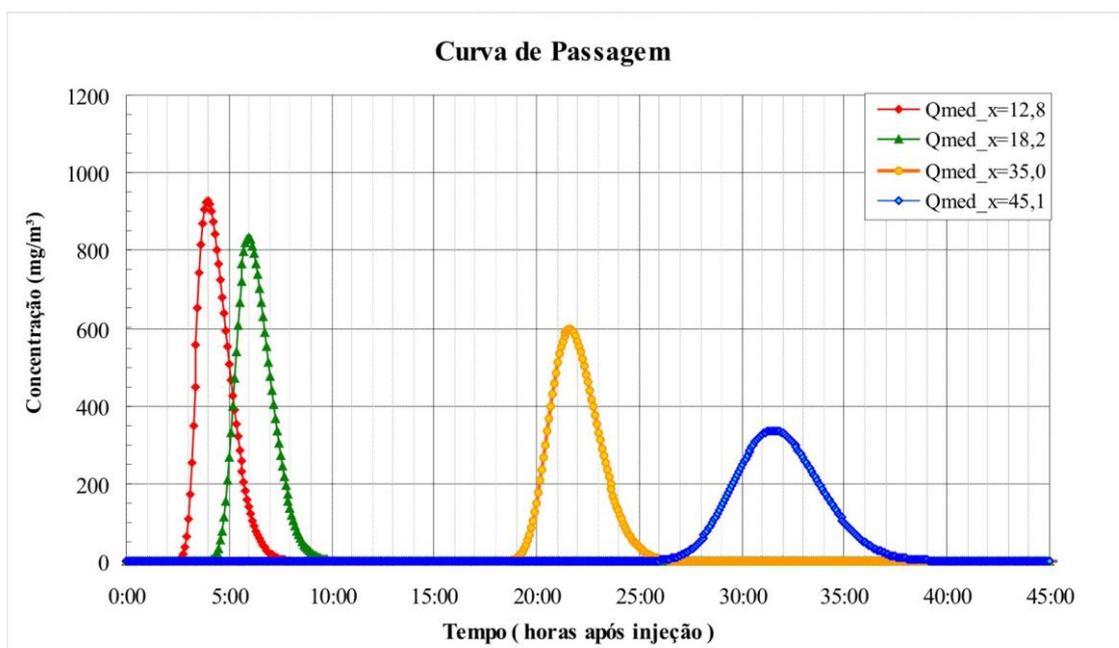


Figura 6.8 - Curva de passagem para a situação de vazão média ( $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ) nas diferentes seções de captação (Usina Termelétrica de Paracambi – 12,8 km; Duke Energy Brasil – 18,2 km; Eletrobolt – 35 km; ETA Guandu – 45,1 km).

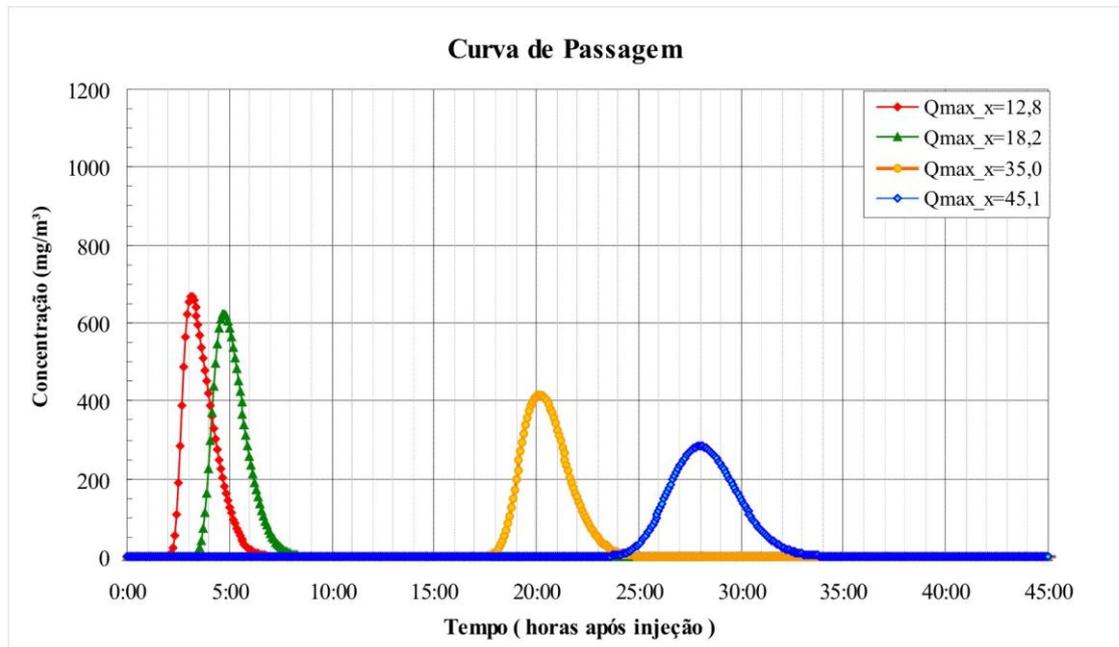


Figura 6.9 - Curva de passagem para a situação de vazão máxima (240 m<sup>3</sup>/s) nas diferentes seções de captação (Usina Termelétrica de Paracambi – 12,8 km; Duke Energy Brasil – 18,2 km; Eletrobolt – 35 km; ETA Guandu – 45,1 km).

Tabela 6.3 - Resultado do cenário simulado.

Distância (km)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Conc. Máxima (mg/m <sup>3</sup> )	Tempo Início (h)	Tempo Final (h)	Tempo de Passagem da Curva (h)
12,8	Qmin	1131,6	02:35	09:55	07:20
	Qmed	926,3	02:15	08:40	06:25
	Qmax	668,2	01:50	07:30	05:40
18,2	Qmin	984,0	04:10	12:55	08:45
	Qmed	832,9	03:40	11:05	07:25
	Qmax	623,2	03:00	09:20	06:20
35,0	Qmin	750,2	18:55	30:15	11:20
	Qmed	597,7	18:05	28:25	10:20
	Qmax	417,0	17:05	26:40	09:35
45,1	Qmin	358,4	25:40	48:05	22:25
	Qmed	337,3	24:00	42:10	18:10
	Qmax	284,9	22:10	37:05	14:55

Analisando as figuras apresentadas e os resultados da Tabela 6.3, observa-se que quanto maior a vazão, menor é o tempo de passagem da curva de poluente para as seções de interesse. Do mesmo modo, os picos de concentrações do poluente diminuem de acordo com o aumento da vazão e conforme as distâncias dos usuários de interesse vão se afastando do local de lançamento.

Para a condição de vazão mínima (120 m<sup>3</sup>/s) no trecho analisado (Figura 6.7), a concentração máxima atingida pelo poluente foi de 1.131,6 mg/m<sup>3</sup> após 4,7 horas do derramamento na seção localizada a 12,8 km do local do acidente e que corresponde a Usina Termelétrica de Paracambi.

Nessas mesmas condições a ETA Guandu, maior usuário deste trecho com captação de água correspondente a 45 m<sup>3</sup>/s, situada a 45,1 km do ponto de lançamento do poluente, atingiu concentração máxima de 358,4 mg/m<sup>3</sup> após 35 horas de lançamento do poluente. O tempo que a curva de passagem levou para passar pela ETA Guandu foi de aproximadamente 22 horas, com início 25,6 horas após o derramamento e final da curva de passagem após 48 horas. Para condição de vazão média (160 m<sup>3</sup>/s), essa pluma de poluente atingiria a ETA Guandu cerca de 24 horas após seu lançamento, já para a condição de vazão máxima (240 m<sup>3</sup>/s) levaria 22 horas. Desse modo, se a concentração do poluente estiver acima de uma concentração permissível para captação de água, a ETA do Guandu poderia se necessário, paralisar sua captação nesse intervalo de tempo delimitado como início e fim da curva de passagem do poluente após a ocorrência do acidente.

Para esse mesmo trecho COSTA e ARAUJO (1980) também realizaram simulações de acidentes com substâncias tóxicas visando determinar os tempos característicos da curva de passagem do poluente na ETA Guandu. Nesse estudo os coeficientes de dispersão foram estimados através de equações empíricas que, como encontrado na literatura, apresentam grandes variações nos resultados obtidos. A variação da concentração do poluente no tempo foi determinada através do modelo de TAYLOR (1954). Na Tabela 6.4 são apresentados os parâmetros de transporte e dispersão utilizados por COSTA e ARAUJO (1980) e os valores obtidos no ensaio com traçadores e utilizados para a simulação do Cenário II deste trabalho.

Tabela 6.4 – Síntese dos resultados apresentados por COSTA e ARAUJO (1980).

Nº	Seção	Ensaio com traçador		COSTA e ARAUJO (1980)		
		U (m/s)	D <sub>L</sub> (m <sup>2</sup> /s)	U (m/s) <sup>1</sup>	D <sub>L</sub> (m <sup>2</sup> /s) <sup>2</sup>	D <sub>L</sub> (m <sup>2</sup> /s) <sup>3</sup>
1	LG351	0,93	58	---	10	---
2	LG352	0,87	72	---	78	44
3	GN201	0,77	65	---	330	204
4	GN202	0,50	20	---	38	184
5	GN200	0,35	55	---	---	184

<sup>1</sup> Os valores médios de velocidade para os trechos não foram apresentados, somente as velocidades para as seções.

<sup>2</sup> Coeficiente de dispersão longitudinal para as seções estudadas.

<sup>3</sup> Valor médio de coeficiente de dispersão determinados para cada trecho.

Os valores contidos na Tabela 6.4 foram utilizados para as simulações da curva de passagem na ETA Guandu cujos resultados são apresentados na Figura 6.10 para uma vazão média de  $180 \text{ m}^3/\text{s}$  com o lançamento de 10 toneladas de massa de um poluente conservativo seguindo o trabalho de COSTA e ARAUJO (1980), bem como o cenário simulado neste capítulo para uma vazão de  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ .

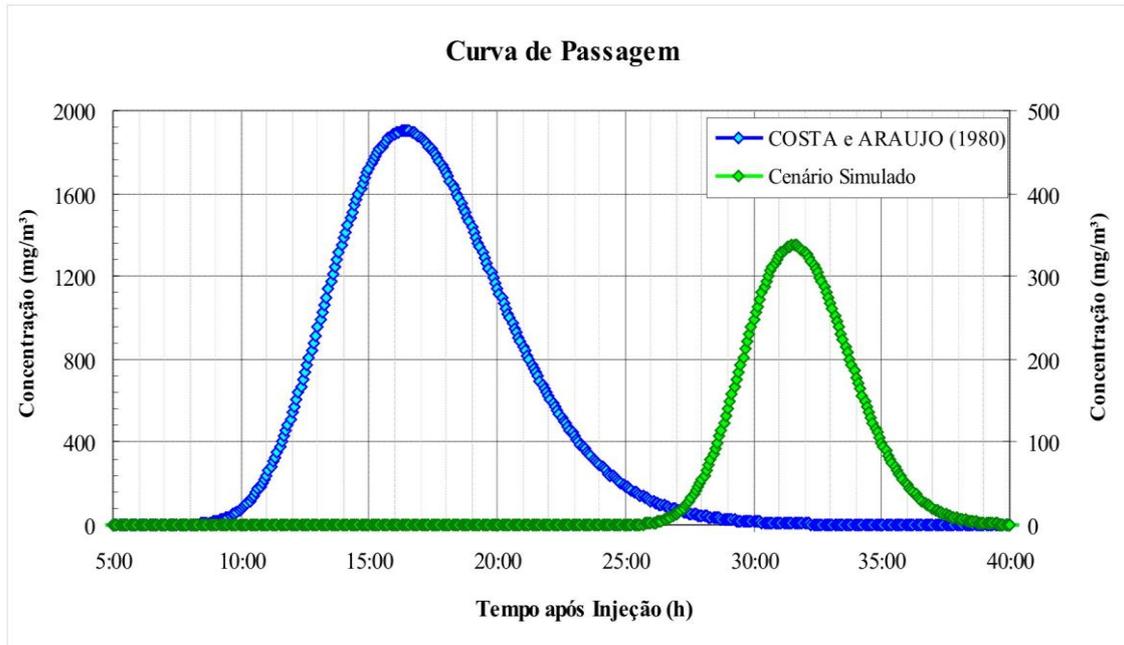


Figura 6.10 – Comparação da curva de passagem apresentada no trabalho de COSTA e ARAUJO (1980) com curva simulada nesse trabalho.

Desse modo, o resultado encontrado por COSTA e ARAUJO (1980), conforme observado na Figura 6.10, indicou que a pluma de poluente chegaria à ETA Guandu cerca de 8 horas após o lançamento. Tais resultados subestimam o tempo de chegada e superestimam o tempo de passagem considerando os valores de coeficientes de dispersão empíricos utilizados. Como mostra a curva simulada a partir dos dados de campo (para as condições de vazão média) o tempo de início e de passagem do poluente são de 24 horas e 18 horas, respectivamente.

### 6.3 Cenário III

Esse cenário de estudo foi desenvolvido a fim de determinar a natureza de um acidente a partir de uma curva de passagem amostral. Por outro lado, pretende-se determinar o local de lançamento e a distribuição de massa de um determinado poluente conservativo através da simulação de um “método inverso”. Os resultados mostraram que, a partir de uma nuvem de poluente, foi possível estimar a que distância ocorreu o lançamento acidental num curso d’água indicando o agente poluidor, seja um acidente natural como, por exemplo, um efluente lançado, ou um acidente nas rodovias que cortam os cursos d’água.

Como base do método, para estimar o local do acidente bem como a quantidade de poluente lançada no curso d’água, parte-se da curva de passagem observada por uma estação de monitoramento ou por coletas manuais, supondo que seja possível a caracterização de substâncias solúveis e conservativas por esta estação. Neste trabalho, a estação considerada (fictícia) está localizada na captação da ETA Guandu, principal usuário de água da área de estudo. Supondo que a curva de passagem monitorada pela estação automática seja representada pela Figura 6.11, para estimar a distância do possível lançamento, parte-se de uma posição inicial procurando a resposta impulsional que seja adequada aos tempos da curva de passagem. Esse método presume que a máxima derivada da curva observada (no flanco de ascendência) coincida com o valor de pico da resposta impulsional.

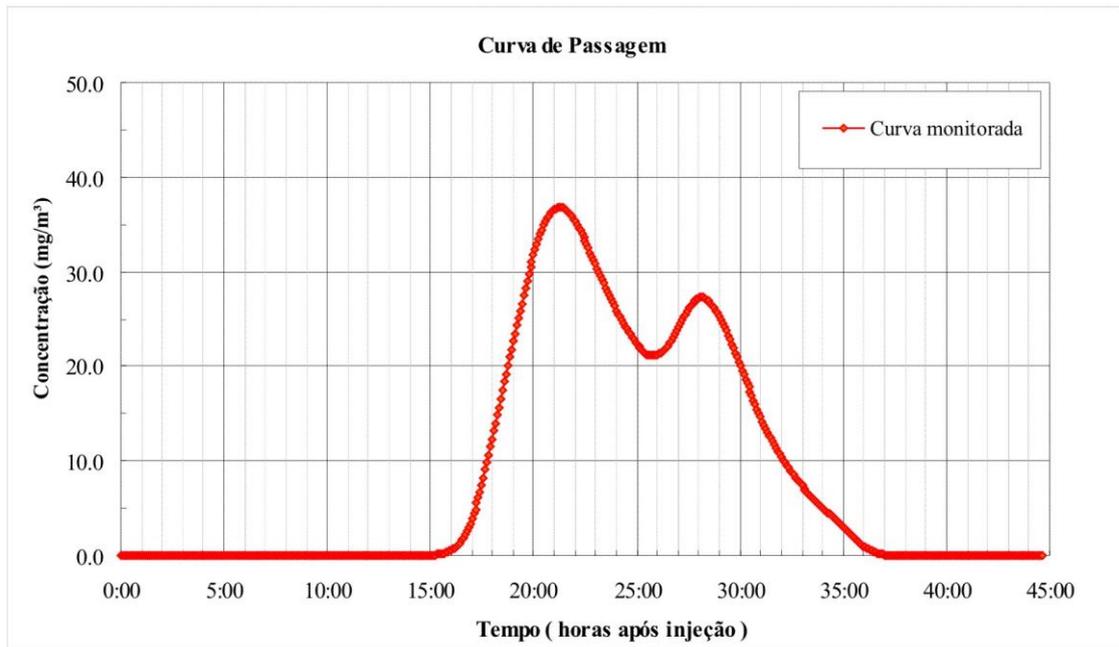


Figura 6.11 – Curva observada na estação de monitoramento de qualidade de água para um possível acidente simulado.

A análise permitiu estimar que o acidente ocorreu a 23,5 km de distância a montante do ponto de monitoramento, com variação ou incerteza determinada em função da velocidade do escoamento e do intervalo de tempo usado na discretização da curva de passagem ( $\Delta x = U \cdot \Delta t$ ). Considerando que, nesse caso, a velocidade média estimada pela campanha com traçador foi de 0,35 m/s e o tempo de amostragem foi  $\Delta t = 5$  minutos, o local do acidente apresenta uma faixa de incerteza de  $\pm 100$  metros.

A partir da distância estimada do lançamento do poluente ( $x = 23,5$  km) foi simulada, através do modelo de Taylor e dos parâmetros estimados com a técnica de traçadores realizada no corpo hídrico em análise, a curva de passagem para esta seção (Figura 6.12).

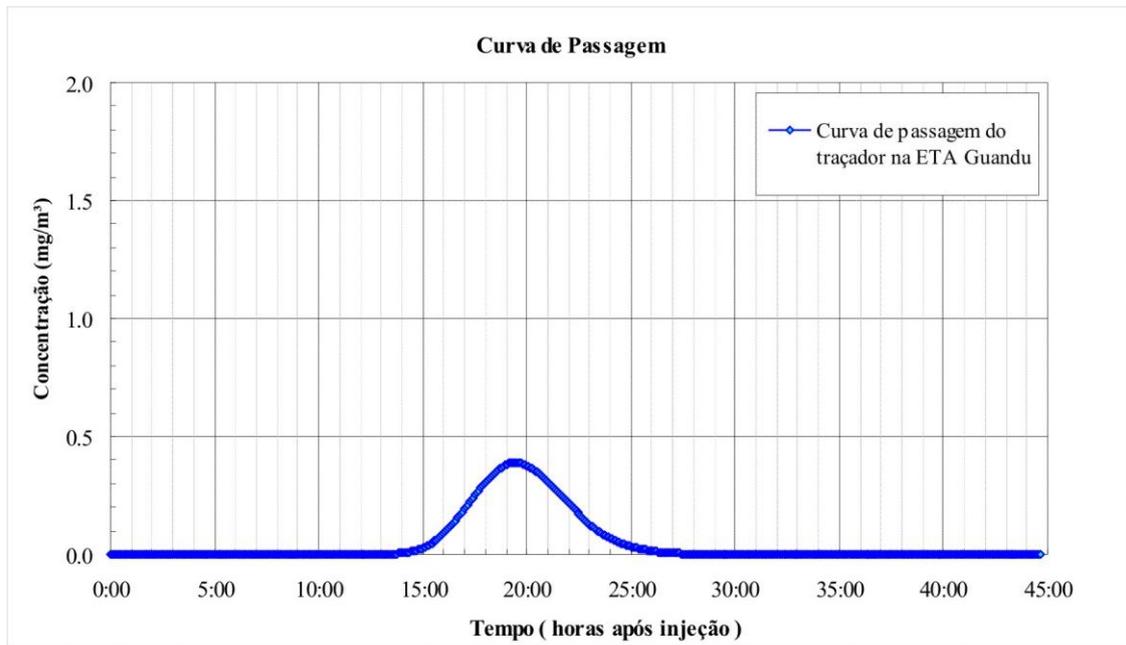


Figura 6.12 – Curva de passagem do traçador na ETA Guandu.

A partir da curva observada na seção de monitoramento e da curva de passagem na seção de interesse (resposta impulsional), foi possível estimar a distribuição de massa de poluente lançada no corpo hídrico, utilizando para isso a técnica da deconvolução matemática. Desse modo a curva característica de massa de poluente derramada no corpo hídrico está indicada na Figura 6.13 e corresponde a uma massa lançada de 175 kg distribuída por aproximadamente 11 horas.

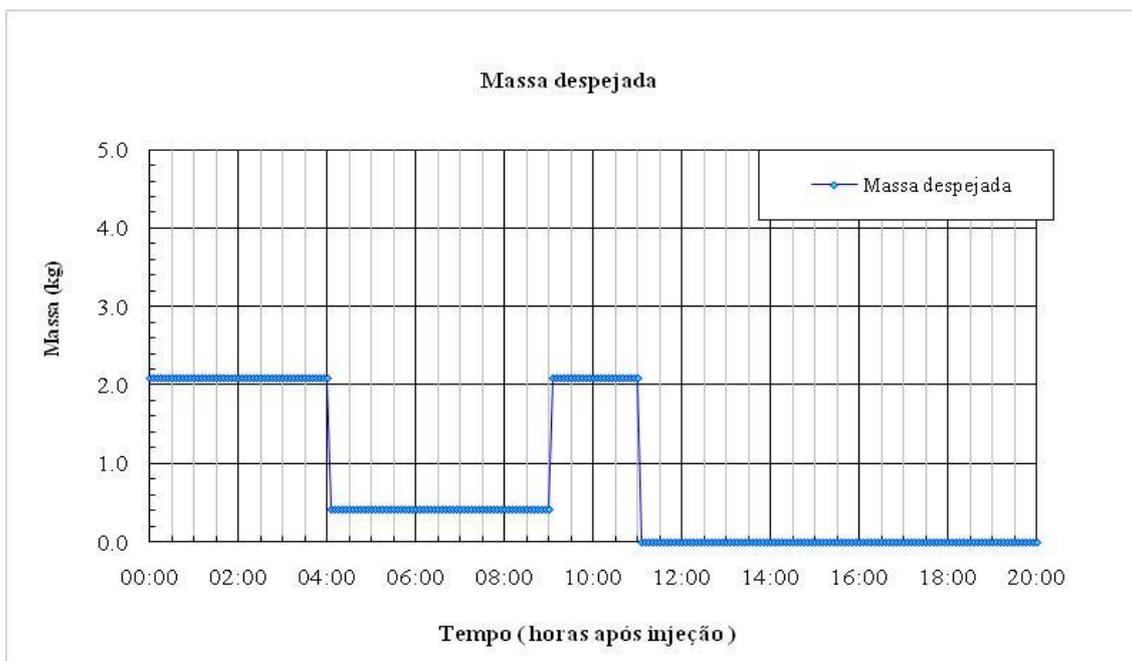


Figura 6.13 – Distribuição de massa do poluente derramado no corpo hídrico a uma distância de 23,5 km a montante da seção de controle.

Associado a distância estimada está localizada a ponte da RJ-125 sobre o rio Guandu no município de Japeri. Assim, é possível concluir que um acidente com produto perigoso pode ter ocorrido nesse ponto com a distribuição de massa caracterizada na Figura 6.13.

Dessa forma, esse método permitiu que fosse estimada a distância e distribuição de massa de um lançamento de um poluente no rio Guandu, corpo hídrico em análise, possibilitando a identificação do provável poluidor, seja um acidente nas rodovias, seja um lançamento de efluente industrial. Essa ferramenta caracteriza uma forma de identificação de um acidente a partir da pluma do poluente monitorada, não caracterizando assim como uma ferramenta de prevenção. Isso seria apenas possível se existissem mais estações de monitoramento automáticas ao longo do corpo hídrico e que estivessem localizadas antes da seção de interesse.

## 6.4 Análise dos Cenários

Nos cenários propostos, a técnica de traçadores foi utilizada como um simulador para um incidente de poluição, sendo possível descrever a pluma do poluente com melhor precisão comparável a outros métodos. Os dois primeiros cenários foram desenvolvidos visando avaliar o comportamento da curva de passagem do poluente em diferentes distâncias das seções de monitoramento, em situações distintas de vazão e variação da distribuição da massa lançada no corpo hídrico. Já o terceiro cenário foi utilizado para estimar a localização de um possível acidente e a distribuição da massa de poluente lançada, permitindo a identificação do possível poluidor.

No primeiro cenário, foi analisado o comportamento da pluma de um poluente em diferentes seções no sistema fluvial em análise, através da resposta a um impulso unitário (massa=1 kg), proveniente da normalização das curvas de passagem do traçador. Adotando-se como ponto inicial de lançamento a seção próxima a estação elevatória de Santa Cecília, no rio Paraíba do Sul, permitiu a análise do comportamento do poluente para diferentes seções de monitoramento localizadas no trecho considerado. Desse modo a passagem completa do poluente por todas as seções monitoradas foi cerca de 210 horas, permitindo que medidas emergenciais sejam gerenciadas a tempo em caso de acidente.

Com base nos resultados desse cenário foi observado que quanto mais próximo o ponto de despejo é da seção de monitoramento, maior é o valor máximo de concentração. Do mesmo modo, quanto mais distante do ponto de lançamento do poluente, os picos das concentrações diminuem, no entanto o poluente permanece por mais tempo na seção de análise. Diferentes simulações podem ser realizadas a partir deste cenário, já que é possível variar os parâmetros do acidente, como massa injetada e distância da seção de interesse.

O segundo cenário foi desenvolvido visando determinar o comportamento do poluente no rio Guandu, principal manancial em análise, em quatro seções de captação selecionadas, para situações distintas de vazão, mínima, média e máxima, com lançamento contínuo de uma massa de 1000 kg por quatro horas representando um acidente próximo a Usina de Pereira Passos. Contudo, para que se tornasse possível a obtenção do comportamento do poluente lançado de maneira contínua no trecho de interesse, fez-se necessário a utilização do conceito da convolução entre as curvas de passagem do poluente nas diferentes seções obtidas pelo

modelo de Taylor, onde os parâmetros de transporte e dispersão foram determinados pelo ensaio com traçadores *in situ*, com a distribuição da massa despejada no corpo hídrico.

Esse cenário permitiu avaliar, para situações de vazão distintas, como o lançamento contínuo de um poluente, solúvel e conservativo, se comporta em diferentes seções situadas a 12,8 km, 18,2 km, 35,0 km e 45,1 km no trecho do rio Guandu, correspondente aos usuários de captação: UTE Paracambi, Duke Energy Brasil, Eletrobolt e, ETA Guandu. Dessa forma, foi possível analisar que o comportamento dos tempos característicos da pluma de poluente varia com a mudança do comportamento hidráulico do trecho, ou seja, quanto menor a vazão, maior é o tempo de duração da curva de passagem do poluente. Do mesmo modo, quanto maior a vazão, menores são concentrações de pico, devido à maior diluição da substância na água. De modo inverso, quanto menor a vazão, maior é a concentração máxima do poluente no rio, conseqüentemente maiores os prejuízos ao ambiente e à população.

Em ambos os cenários foram considerados como tempo de início e fim da curva de passagem do poluente simulado como sendo os tempos associados às curvas que representavam valores superiores a  $0,01 \text{ mg/m}^3$  da concentração na seção considerada. No entanto, para resultados que expressem a realidade de um acidente com poluente, deve levar em consideração os limites de concentração máxima permissível do produto tóxico em questão, permitindo assim que sejam definidos os tempos em que a captação de água por algum usuário deverá ser paralisada.

O terceiro cenário desenvolvido permitiu a estimativa da localização e distribuição da massa de um poluente lançado no rio Guandu através da deconvolução matemática, possibilitando a identificação do provável poluidor. Essa ferramenta caracteriza uma forma de identificação de um acidente a partir da pluma do poluente monitorada, entretanto não pode ser caracterizado como uma ferramenta de prevenção, visto que essa estimativa só é possível depois da ocorrência do acidente. Os resultados deste cenário permitiram afirmar que o acidente ocorreu a 23,5 km a montante da seção de monitoramento, com faixa de variação de  $\pm 100$  metros determinada a partir da velocidade do escoamento e da discretização do tempo da curva de passagem. Já a distribuição da massa estimada foi de aproximadamente 175 kg por cerca de 11 horas.

Ressalta-se que para determinação da fonte poluidora é importante avaliar e conhecer a bacia hidrográfica de maneira sistêmica, incluindo os dados físicos da bacia; informações sobre o comportamento hidráulico dos corpos d'água; uso e ocupação do solo; caracterização

sócio-econômica; localização, quantificação e tendência das principais fontes poluidoras; e, diagnóstico da situação atual da qualidade da água. Também deve ser considerado as características do poluente lançado no corpo hídrico receptor para avaliação do impacto da poluição e a auxílio para determinação de sua origem. Faz-se necessário levantamentos de campo na área de interesse, incluindo amostragem dos poluentes, análises de laboratório, medição de vazão e outros. Os parâmetros analisados podem determinar as características do lançamento e auxiliar na identificação da fonte poluidora. De maneira geral, os poluentes são frequentemente originários de esgotos domésticos, despejos industriais, escoamentos de superfície, sejam estes em áreas urbanas ou rurais. Do mesmo modo, ocorrências de acidentes com produtos perigosos nas rodovias que cortam os cursos d'água conforme o foco desse estudo.

Os resultados da simulação de diversos cenários de acidentes permitem a análise das possíveis opções de intervenção na emergência e possibilita selecionar aquelas que mais se adéquam na fase prévia à ocorrência de acidente.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo desse trabalho foi contribuir com os estudos sobre a previsão da dispersão de poluentes derramados nos acidentes em rodovias, e o modo de gerar informações relevantes sobre o problema de despejo acidental no transporte rodoviário de produtos perigosos e sua propagação em cursos d'água.

Foi selecionado como área de estudo um trecho com cerca de 80 km de curso d'água localizado entre a estação elevatória de Santa Cecília, na Bacia do Rio Paraíba do Sul, e a montante da captação da ETA Guandu, na Bacia do rio Guandu. Este trecho é de vital importância para o estado Rio de Janeiro, pois nele está situada a ETA do Guandu, responsável pelo abastecimento de cerca de 9 milhões de habitantes da RMRJ. Esta área de estudo possui um pólo industrial significativo, com grandes indústrias, o que potencializa a utilização destas vias como rota de movimentação de produtos perigosos produzidos ou utilizados por essas indústrias, favorecendo assim ocorrências acidentais.

Estudos de campo foram realizados nesse trecho pelo Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ para medir *in situ* as características de transporte e diluição de contaminantes solúveis através do lançamento instantâneo de traçadores fluorescentes. As curvas de passagem de traçador foram ajustadas pelo modelo de Taylor para obtenção dos parâmetros de transporte e dispersão de poluentes através dos valores observados *in situ* durante as campanhas de campo.

A área de estudo e os cursos d'água de interesse, foram selecionados com o auxílio de um sistema de informação geográfica, onde as rodovias identificadas na região foram sobrepostas à hidrografia, permitindo a identificação dos principais pontos críticos a possíveis acidentes e a determinação das distâncias das seções de captação de interesse ao ponto de lançamento do poluente utilizadas para as simulações realizadas.

Uma metodologia foi aplicada à calha principal do trecho selecionado para transformar o lançamento de poluentes solúveis e conservativos no curso d'água, decorrente de um acidente rodoviário, em curvas de passagem da substância ao longo de todo o trecho. Os demais cursos d'água que influenciavam o trecho escolhido não foram estudados considerando a não disponibilidade de dados hidráulicos e de transporte e dispersão de poluentes.

Para estimar a variação no espaço e no tempo dos poluentes derramados foram desenvolvidos cenários de simulação. Os cenários foram simulados com comportamento hidráulico distinto e com variações das características do acidente em diferentes seções no trecho selecionado. A técnica da convolução permitiu a simulação do lançamento do poluente de forma contínua no corpo hídrico.

Os dados hidrológicos utilizados nos cenários foram obtidos a partir de séries históricas de vazões disponibilizadas pela Light, operadora de energia elétrica do Estado do Rio de Janeiro, para o período entre 2005 a 2010. Para a simulação no rio Guandu foram utilizados os dados obtidos do posto fluviométrico UHE Pereira Passos Jusante (Código Light: V-3-489).

Os resultados dos cenários permitiram identificar que o comportamento dos tempos característicos da pluma de poluente varia com a mudança do comportamento hidráulico do trecho, ou seja, quanto menor a vazão maior é o tempo de duração da curva de passagem do poluente. Do mesmo modo, no que se refere às concentrações nas captações, para a situação de vazão máxima, o poluente apresenta as menores concentrações de pico devido à maior diluição da substância na água. De modo inverso, quanto menor a vazão, maior é a concentração máxima do poluente no rio, conseqüentemente maiores os prejuízos ao ambiente e à população.

Os resultados obtidos por meio dos cenários simulados indicam que para uma situação de vazão típica, determinada durante o ensaio com traçador, a curva de passagem para um lançamento próximo a estação elevatória de Santa Cecília leva cerca de 210 horas para passar por todo trecho analisado.

Para o lançamento do poluente simulado no trecho inferior, correspondente ao rio Guandu, os tempos das curvas de passagem da substância na seção 1 tiveram início às 02:35, 02:15 e 01:50, e término às 09:55, 08:40 e 07:30 horas após o lançamento do poluente para as vazões mínima, média e máxima, respectivamente. Para a seção 2, os tempos de início e término da pluma de poluente para a vazão mínima foram de 04:10 e 12:55, para a situação de vazão média esses tempos foram de 03:40 e 11:05, já para vazão máxima o tempo de início da curva de passagem foi de 03:00 horas com término às 09:20 horas após o lançamento do poluente. Para a seção 3 esses tempos característicos da curva de passagem tiveram início às 18:55, 18:05 e 17:05, e término às 30:15, 28:25 e 26:40 horas, correspondente às vazões mínima, média e máxima. Já para a seção 4, correspondente a ETA Guandu, as curvas de

passagem do poluente tiveram início às 25:40, 24:00 e 22:10 e término às 48:05, 42:10 e 37:05, para as vazões mínima, média e máxima alertando assim a captação de diversos usuários no rio Guandu o comportamento do poluente em diferentes seções.

Portanto, os tempos característicos obtidos com os cenários desenvolvidos visam auxiliar na restrição das captações e no planejamento de medidas corretivas caso um acidente ocorra. Desse modo, os resultados permitem alertar os diversos usuários de água do rio para eventuais interrupções na captação, indicando, em função da concentração máxima permissível de determinado poluente lançado, quando deve ser suspensa e retomada a captação da água.

Através da deconvolução numérica entre uma suposta curva observada por uma estação de monitoramento junto à ETA Guandu e a curva unitária de passagem do traçador para essa seção, foi possível estimar a localização do acidente simulado e a distribuição da massa de poluente lançada, identificando assim o possível poluidor.

Dessa forma, o desenvolvimento deste trabalho possibilitou, a simulação do efeito de um despejo acidental de poluente em uma seção de interesse a jusante do ponto de lançamento, auxiliando, principalmente, como um mecanismo de alerta em situações de despejo de substâncias perigosas no trecho do curso d'água em estudo. Desse modo, a metodologia proposta mostrou-se eficiente na simulação do transporte do poluente solúvel para o trecho de curso d'água selecionado, permitindo a quantificação aproximada do tempo de passagem e da concentração para o lançamento proposto.

## **Recomendações**

O modelo de cálculo proposto considerou um trecho com cerca de 80 km de curso d'água compreendidos entre a estação elevatória de Santa Cecília e a captação de água da ETA Guandu, escolhido por já serem conhecidas as características hidrodinâmicas desse trecho, obtida através de ensaios de traçadores artificiais. No entanto, recomenda-se que sejam realizados estudos nos demais corpos hídricos que influenciam a captação da ETA Guandu, permitindo assim conhecer as suas características de transporte e dispersão.

Diante da importância do rio Guandu para RMRJ é necessário que seja implementado um programa de monitoramento de quantidade e qualidade de água em toda sua bacia hidrográfica por meio de estações hidrométricas/meteorológicas.

Recomenda-se ainda que as simulações sejam aplicadas para despejo provenientes de diversas origens, como lançamentos de poluentes industriais, de estações de tratamento, entre outros. Visto que, nesse trabalho os cenários foram realizados considerando apenas despejo acidental de poluentes como consequência de acidentes no transporte rodoviário de produtos perigosos. Contudo, para isso, faz-se necessário a definição das atividades potencialmente poluidoras estabelecidas às margens do trecho analisado.

O conhecimento dos tempos característicos da curva de passagem do poluente nas seções de captação, permite que seja implementado um sistema de alarme para o caso de acidentes. O sistema deve incluir estações de monitoramento automático, rede telemétrica, um sistema computacional de apoio e uma rede de comunicação com as autoridades competentes para a tomada de medidas emergenciais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2006, *Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim*. Relatório do Plano – Versão Final, Brasília, Brasil.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2007, *Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim*. Relatório Síntese, Brasília, Brasil.

ANI, E. C., 2010, *Modelling of pollutant transport in rivers: process engineering approach*. PhD in Chemical Engineering, University Cluj-Napoca Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Chair of Chemical Engineering and Oxide Materials Science, Cluj-Napoca, Romania.

ANTT - AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. *Resolução nº 240/2004*. Disponível em: [www.antt.gov.br](http://www.antt.gov.br). Acesso em: 2 nov. 2010.

ALEXANDER, C. E.; QUINLAN, J. F., 1992, *Practical Tracing of Ground Water*, with Emphasis on Karts Terranes, Geological Society of América: Cincinnati, Ohio, v. 1.

AMARAL, V. M., 2009, *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., Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ARAÚJO, G. M. de, 2007, *Regulamentação do transporte terrestre de produtos perigosos comentada*. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Gerenciamento Verde.

- BARBOSA JR., A. R.; SILVA, G. Q.; NEVES, et. al, 2005, “Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d’água naturais Parte 1 - Fundamentos teóricos”, *Revista Escola de Minas*, v. 58, n. 1.
- BEDMAR, A. P.,1972, *Isotopos en Hidrologia*. Ed. Alhambra, pp. 71 – 89.
- BEHRENS H., BEIMS U., DIETER H., et. al, 2001, “Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers”. *Hydrogeology Journal*, v. 9, n. 3, pp. 321-325.
- BENISCHKE, R., 1989, “Fluorescent Tracers in Hydrology, principles, instrumentation, Physico-Chemical Properties, Analytics”, *Institute for Geothermics & Hydrogeology, Joanneum Research*.
- BOYD, C. E. 2000, *Water Quality: An Introduction*. Kluwer Academic Publishers. Massachusetts.
- BRASIL, *Política Nacional de Recursos Hídricos*. 1997, Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. MMA/SRH.
- BRASIL. *Decreto nº 96.044*, de 18 de maio de 1988. Aprova o Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos e dá outras providências. Diário Oficial [da União], Brasília, 19 de Maio de 1988.
- BROER, G.J.A.A., 1991, “Alarm system for accidental pollution on the river Rhine”, *Hydrology for the Water Management of Large River Basin*, IAHS Publ., 201, 329 – 336.
- BÜGE, T. R., 1990, *Modelo matemático para simulação de transporte e dispersão de poluentes em rios: aplicação ao estudo de lançamento acidental no rio Paraíba do Sul (Rio de Janeiro)*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- CAMPOS, J. D. 2005, *Desafios do gerenciamento dos recursos hídricos nas transferências naturais e artificiais envolvendo mudança de domínio hídrico*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro.
- CAPLOW T., SCHLOSSER P., HO D., 2004, “Tracer study of mixing and transport in the upper Hudson River with multiple dams”, *Journal of Environmental Engineering*, 130, 1498-1506.
- CARVALHO, G. B. B.; THOMAS, P. T. & GONTIJO JÚNIOR, W. C., 2007, “Cobrança pelo uso de recursos hídricos na transposição da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul para a Bacia Hidrográfica do Rio Guandu”. In: *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Anais: ABRH, São Paulo.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2005, *Resolução nº 357/2005*, Brasília/DF.
- COPPETEC, 1991, “*Determinação "in situ" das Velocidades Médias de Trânsito e Coeficientes de Dispersão entre Santa Cecília e a ETA do Guandu (CEDAE)*”, In.: Projeto COPPETEC ET-150422.
- COPPETEC, 2003, “*Medições de Parâmetros de Transporte e Dispersão no Rio Guandu – Relatório Final*”, In.: Projeto CTHIDRO Meta 13.
- COSTA, H. G. P. da, ARAUJO, L. S., 1980. *Aspectos gerais sobre a utilização das águas do rio Guandu*. Rio de Janeiro, FEEMA, 47 p.
- DEVENS, J. A.; BARBOSA JR., A. R.; SILVA, G. Q., 2006, “Modelo de quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal de pequenos cursos de águas naturais”. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 11, Nº 3, p. 269 – 27.
- DEVENS, J. A. 2006, *Quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal em pequenos cursos d'água naturais com o uso de traçador ambientalmente neutro*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

- FERREIRA, C. E. C., 2003, “Acidentes com Motoristas no Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos”. *Revista São Paulo em Perspectiva*, Vol.17, pp 68 – 80.
- FISCHER, H. B., LIST, E. J., IMBERGER, J., KOH, R. C. Y., and BROOKS, N. H., 1979, *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, New York.
- HAYES, M., 1998. *Schaum's Outline of Digital Signal Processing (Schaum's)*. McGraw-Hill; 1 edition, USA.
- HAYKIN, S.; VEEN, B. V., 1999. *Sinais e Sistemas*. Bookman, Porto Alegre, RS.
- HUBBARD, E. F., F. A. KILPATRICK, L. A. MARTENS, et. al, 1982, “Measurement of time of travel and dispersion in streams by tracing”. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, Book 3, Chapter A9, 44 pages.
- HUNSDORFER, W., VERWER, J.G., 2003, *Numerical Solution of Time-Dependent Advection-Diffusion-Reaction Equations*, Springer Series in Computational Mathematics, vol. 33, Springer, Berlin.
- IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE, 2008, *Acidentes Ambientais 2006 e 2007*. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA/MMA, Brasília.
- IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE, 2009, *Acidentes Ambientais 2008*. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA/MMA, Brasília.
- IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE, 2010, *Acidentes Ambientais 2009*. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA/MMA, Brasília.

INEA, Instituto Estadual do Ambiente, 2011, Relatórios de Vistoria do Serviço de Operações de Emergências Ambientais (SOPEA) no período de 2009 a 2010. Consultados no INEA. Rio de Janeiro.

JAMES, A, 1984, *An Introduction to Water Quality Modelling*, Nova York, John Wiley and Sons.

JOBSON, H. E., 1996, “Prediction of Travel time and Longitudinal Dispersion in Rivers and Streams”, *Diane Publishing Co.*, PA, USA.

LEIBUNDGUT C., SPEILDEL U., and WIESNER H., 1993, “Transport processes in rivers investigated by tracer experiments”, in *Tracers in Hydrology*, edited by N. E. Peters et al., IAHS Publ., 215, 211 – 217.

LEIBUNDGUT C., KULLS C., MALOZSZEWSKI P., 2009, *Tracers in Hydrology*. West Sussex, John Wiley and Sons, 432p.

LIGHT, 2005, *Contribuições da LIGHT Serviços de Eletricidade S.A. Audiência Pública nº 004/2005*, Nota Técnica, TEIF-TEIP AP 004/2005.

LIMA, Claudio A A; GIORGETTI, M. F., 1997, *Aplicação do Modelo Qual2E na Simulação de Descargas Acidentais Contaminantes*. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997, Foz do Iguaçu. Anais eletrônicos: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo. ABES, p. 2534-2545.

LIVI, C. P., 1997, *Fundamentos de fenômenos de transporte: um texto para cursos básicos*. Rio de Janeiro: Sub-Reitoria de Ensino de Graduação e Corpo Discente, UFRJ. v. 2. (Cadernos didáticos UFRJ, 30).

LYONS, R. G., 2011. *Understanding Digital Signal Processing*. Prentice Hall, 3a Edition, Michigan, USA.

- MACHADO, M. B., 2006, *Modelagem tridimensional da dispersão de poluentes em rios*. Tese de D.Sc., Unicamp, São Paulo, SP.
- MACHADO, M. B.; FURLAN, L. T.; FURLAN, M. L., et al, 2008, “Software para modelagem de dispersão de efluentes em rios”. *Revista Engenharia Sanitária Ambiental*, Vol.13 - Nº 3, pp 291-297.
- MAI, S., LIPPERT, D., BARJENBRUCH, U., 2006, *Operational Modelling of Contaminant Transport in the River Elbe*. 7th International Conference on Hydroinformatics HIC, Nice, FRANCE.
- MALM, O.; PFEIFFER, W.C.; FISZMAN, M. & AZCUE, J.M.P., 1988, “Transport and availability of heavy metals in the Paraíba do Sul – Guandu River System, Rio de Janeiro State, Brazil”. *The Science of the Total Environment*, 75: p. 201-209.
- MALM, O.; PFEIFFER, W.C.; FISZMAN, M.; AZENE, J.M.P., 1989, “Heavy metal concentrations and availability in the bottom sediments of the Paraíba do Sul-Guandu river system, RJ, Brazil”. *Environmental Technology Letters*, London, v.10, p.675-680.
- MOREIRA, R. M., 2008, *Quebra do Paradigma da Gestão por Bacia Hidrográfica: Estratégia para Recuperação de um Sistema Hídrico de Interesse das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- NARDOCCI, A. C.; LEAL, O, L., 2006, “Informações sobre Acidentes com Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos no Estado de São Paulo: os desafios para a Vigilância em Saúde Ambiental”. *Saúde e Sociedade*, v.15, n.2, pp 113-121.
- PECLY, J. O. G., 2000, *Monitoramento ambiental do emissário submarino de Ipanema usando traçadores e técnicas geoestatísticas*. Dissertação de M.Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- PEDRO, F. G., 2006, *Acidentes com transporte rodoviário de produtos perigosos: análise e aplicação de modelo conceitual georreferenciado para avaliação de risco ambiental no município de Campinas – SP*. Dissertação de M.Sc, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- PEREIRA, V. S. A., 2006, *Proposta de uma metodologia para análise de outorgas de uso da água em regiões sujeitas à influência de maré*. Dissertação de M.Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- RAMOS, V. S., 2006, *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.
- REAL, M. V.; BRAGA, M.G.C., 2000, “Controle de riscos no transporte rodoviário de produtos perigosos no Brasil - Uma proposta”. *XIV ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Gramado, Rio Grande do Sul, RS.
- RIBEIRO, C. B. M., 2007, *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.
- RIGO, D., 1992, *Dispersão longitudinal em rios: desempenho de métodos de previsão e de traçadores fluorescentes*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ROLDÃO, J. S. F., PECLY, J. O. G, TRENTO, A., 1996, “Determinação de coeficientes de dispersão mediante traçadores fluorescentes na laguna Setubal (Argentina)”. In: *anais do XVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica (IAHR)*, v. 1, pp 57-68, Outubro de 1996, Quayaquil, Equador.

- ROLDÃO, J.S.F., PECLY, J.O.G, 1998, “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*, Agosto de 1998, Santa Fé, Argentina.
- ROLDÃO, J. S. F., WILSON JR., G, SOARES, J. H. P., et. al, 1995, “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, Novembro de 1995, Recife, Pernambuco, PE.
- ROWIŃSKI P.M., 2006, “Accidental release problems in natural rivers: alarm models and experimental investigations”, In: *Models and Techniques for Health and Environmental Hazard Assessment and Management*. MANHAZ Monograph, Part 3: Pollutant Transport in Water Bodies, IEA, ISBN 83-914809-7-6, pp. 104-117.
- RUTHERFORD, J. C., 1994, *River mixing*. Chichester: J. Wiley.
- SCHENINI, P. C., NEUENFELD, D. R., ROSA, A. L. M., “O gerenciamento de riscos no transporte de produtos perigosos”. *XIII SIMPEP*, Bauru, São Paulo, Novembro, 2006.
- SCHNOOR, J. L., 1996, *Environmental Modelling Fate and Transport of Pollutant in Water, Air and Soil*, John Willey and Sons.
- SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMADS), 1998, *Macroplano de Gestão e Saneamento Ambiental da Bacia da Baía de Sepetiba - Relatório final*. Rio de Janeiro: SEMADS, MMA, PNMA. Consórcio ETEP/ ECOLOGUS/SM Group.
- SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMADS), 2001, *Bacias Hidrográficas e Recursos Hídricos da macrorregião 2 - Bacia da Baía de Sepetiba*, In: Projeto PLANÁGUA SEMADES/GTZ de cooperação técnica Brasil-Alemanha, Rio de Janeiro.

- SERBER, J. B., 2005, *Diagnóstico ambiental das atividades do pólo industrial de Queimados como subsídio ao termo de ajustamento de conduta na gestão sustentável da bacia hidrográfica do rio Guandu, RJ*. Dissertação de M.Sc., PEAMB/UERJ, Rio de Janeiro, RJ.
- SILVA, A.P., OLIVEIRA, E.F., CONSOLI, M.A.F., et al, 2009, *Aspectos Críticos da Poluição na Bacia do Rio Guandu e Sua Influência Sobre o Abastecimento de Água da População do Rio de Janeiro*. 49º Congresso Brasileiro de Química, Porto Alegre, RS.
- SILVA, C. R. de, RIBEIRO, C. B. de, SILVA, D. D., et. al, 2010. “Avaliação de impactos em cursos d’água a partir de despejos acidentais de poluentes solúveis”, In: *I Simpósio de Engenharia Sanitária e Meio Ambiente da Zona da Mata Mineira (SESMAZ)*, maio de 2010, Juiz de Fora, JF, Anais do I SESMAZ.
- SILVA, L. L.; DONNICI, C. L.; AYALA, J. D., et. al, 2009, “Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos”. *Química Nova*, v. 32, n. 6, 1576-1585.
- SMART, P.L. and LAIDLAW, I.M.S., 1977, An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing: *Water Resources Research*, v. 13, no. 1, p. 15-33.
- STRAUCH, C. E., 2004, *Acidentes com produtos perigosos no transporte rodoviário no estado do Rio de Janeiro: Propostas de melhoria nas ações que visam as respostas emergenciais*. Dissertação de M.Sc., Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- TAYLOR, G. I., 1954, “Dispersion of matter in turbulent flow through a pipe.” *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 223, 446–468.
- TEIXEIRA, E. C.; CHACALTANA, J. T. A.; SIQUEIRA, R. N.; et. al, 2007, “Proposta de calibração de modelos hidrodinâmicos aplicados a unidades de contato utilizando uma

- função de distribuição de tempos de residência”, *Revista Engenharia Sanitária Ambiental*. v. 12, n 1, pp 79-89.
- THOMAS, P. T.; GONTIJO, W. C. J. *Cobrança pelo Uso de Recursos Hídricos na Transposição da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul para a Bacia Hidrográfica do Rio Guandu*. 2006. 24f. Nota Técnica no 002 /2006/SAG – Agência Nacional de Águas, Brasília.
- VERGINASSI, A.; DORES, E. F. G. C., WEBER, O. L. S., et. al, 2007, “Acidentes ambientais no transporte rodoviário”. *Revista Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal*, v. 4, n 1, pp 103-119.
- VIANA, V. J., 2009, *Riscos ambientais associados ao transporte de produtos perigosos na área de influência da ETA Guandu – RJ*. Dissertação de M.Sc., PEAMB/UERJ, Rio de Janeiro, RJ.
- VON SPERLING, M., 1998. Análise dos padrões brasileiros de qualidade de corpos d’água e de lançamentos de efluentes. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos-RBRH*. Porto Alegre, v. 3, n. 1, p. 111-132, jan./mar.
- WILLIAMS, B. J., 2006, *Hydrobiological modeling*. University of Newcastle, NSW, Australia.
- WILSON, D. A., BUTCHER, D., LABADZ, J. C. & BARRACLOUG, A., 1995, “Protection of drinking water abstraction points from rivers”, *Assessing and Managing Health Risks from Drinking Water Contamination: Approaches and Applications*, IAHS Publ. nº 233.
- WILSON JR., J. F., COBB, E. D., KILPATRICK, F. A., 1986, *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.

## Sites Consultados

Portal DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/pp/>. Acessado em março de 2010.

Portal CETESB. Disponível em:

<http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/rodoviaros/atendimento.asp>. Acessado março de 2010.

Portal IBAMA. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br>. Acessado em março de 2010.

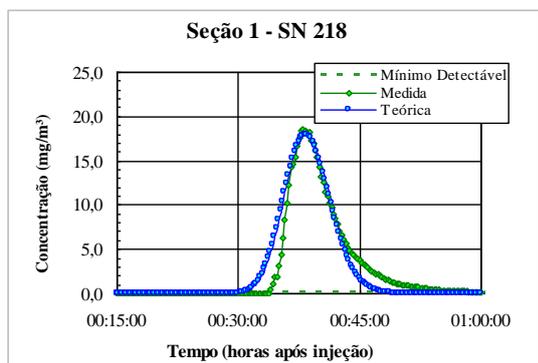
Portal Transporte Produtos Perigosos. Disponível em: <http://www.trpp.com.br>. Acessado em fevereiro de 2010.

Portal INEA. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/fma/sub-bacia-guandu.asp>. Acessado em julho de 2010.

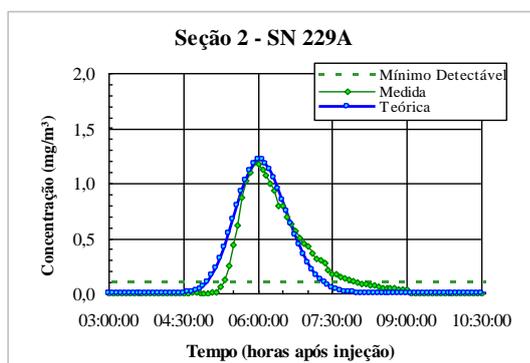
**APÊNDICE**  
Curvas unitárias dos ensaios com traçadores.

As figuras abaixo representam a resposta ao impulso de massa unitária nas seções de monitoramento dos ensaios com traçadores, através de injeções instantâneas. No trecho houve mais de uma injeção de traçador, mais detalhes na Seção 6.4 dessa dissertação onde são descritos os ensaios realizados com traçadores na área de estudo para obtenção de parâmetros de transporte e dispersão de poluentes.

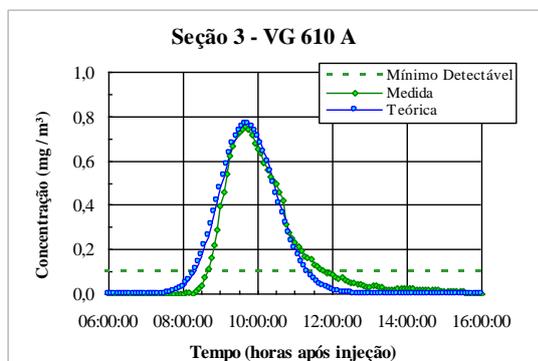
Para a primeira campanha de traçadores, realizada em 1991 no trecho entre a estação elevatória de Santa Cecília e a captação da ETA Guandu, as curvas que representam a resposta impulsional de massa unitária após a normalização são apresentadas na Figura .



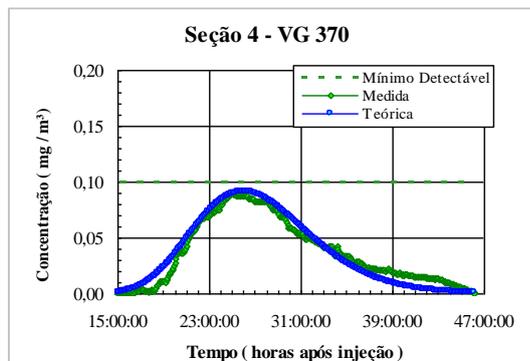
(a)



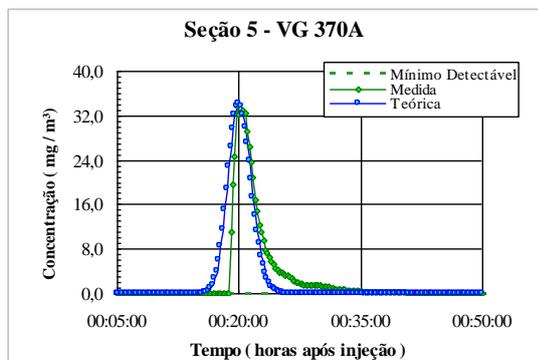
(b)



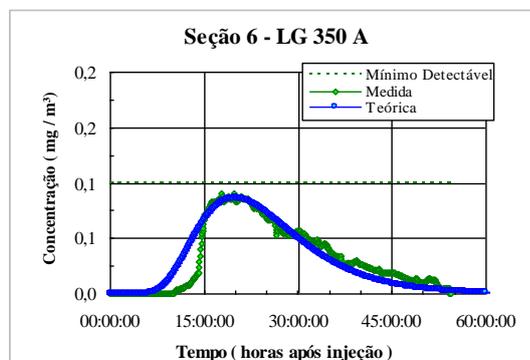
(b)



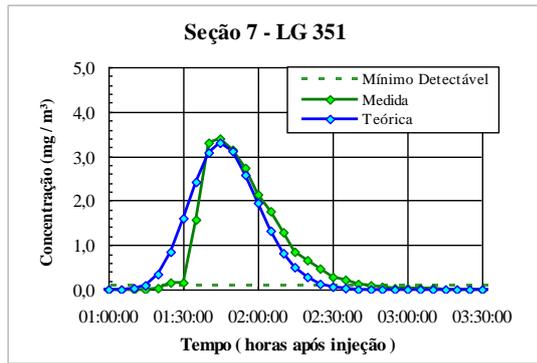
(d)



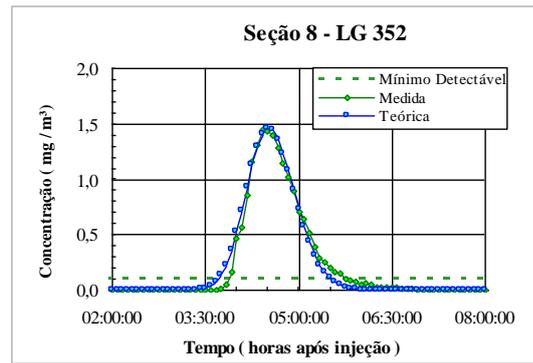
(e)



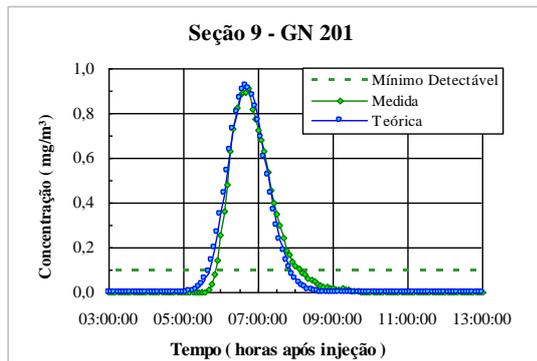
(f)



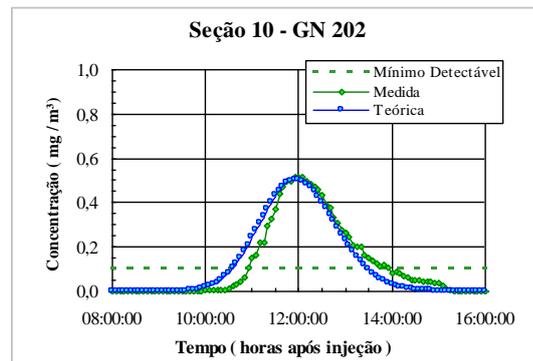
(g)



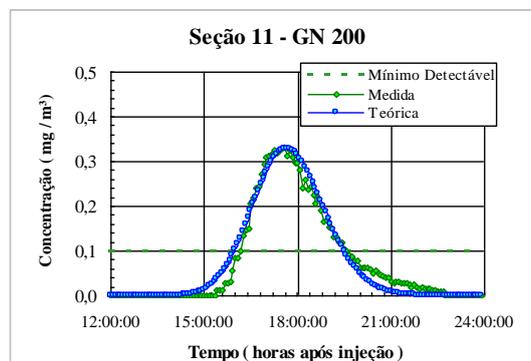
(h)



(i)



(j)



(k)

Figura 1 – Curvas de passagens unitárias das seções de monitoramento da primeira campanha com traçador. (a) Seção 1 - Final do Canal de Santa Cecília (Barra do Piraí). (b) Seção 2 - Meio do Reservatório de Santana entre Barra do Piraí e Piraí. (c) Seção 3 - Tomada d'água da Usina Elevatória Vigário (Piraí). (d) Seção 4 - Canal de adução de Vigário (Piraí). (e) – Seção 5 - Canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Nilo Peçanha. (f) Seção 6 - Canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Pereira Passos. (g) Seção 7 - Ponte na Via Dutra sobre o Ribeirão das Lages. (h) Seção 8 - Ponte sobre o Ribeirão das Lages em Paracambi. (i) Seção 9 - Ponte sobre o rio Guandu em Japeri. (j) Seção 10 - Ponte na Via Dutra sobre o rio Guandu. (k) Seção 11 - ETA do rio Guandu (CEDAE).

Já para a segunda campanha de traçadores, realizada em 2003 em parte do trecho selecionado para este estudo, ou seja, entre a Usina Hidrelétrica Pereira Passos e a captação da ETA Guandu, as curvas que representam a resposta impulsional de massa unitária após a normalização são apresentadas na Figura .

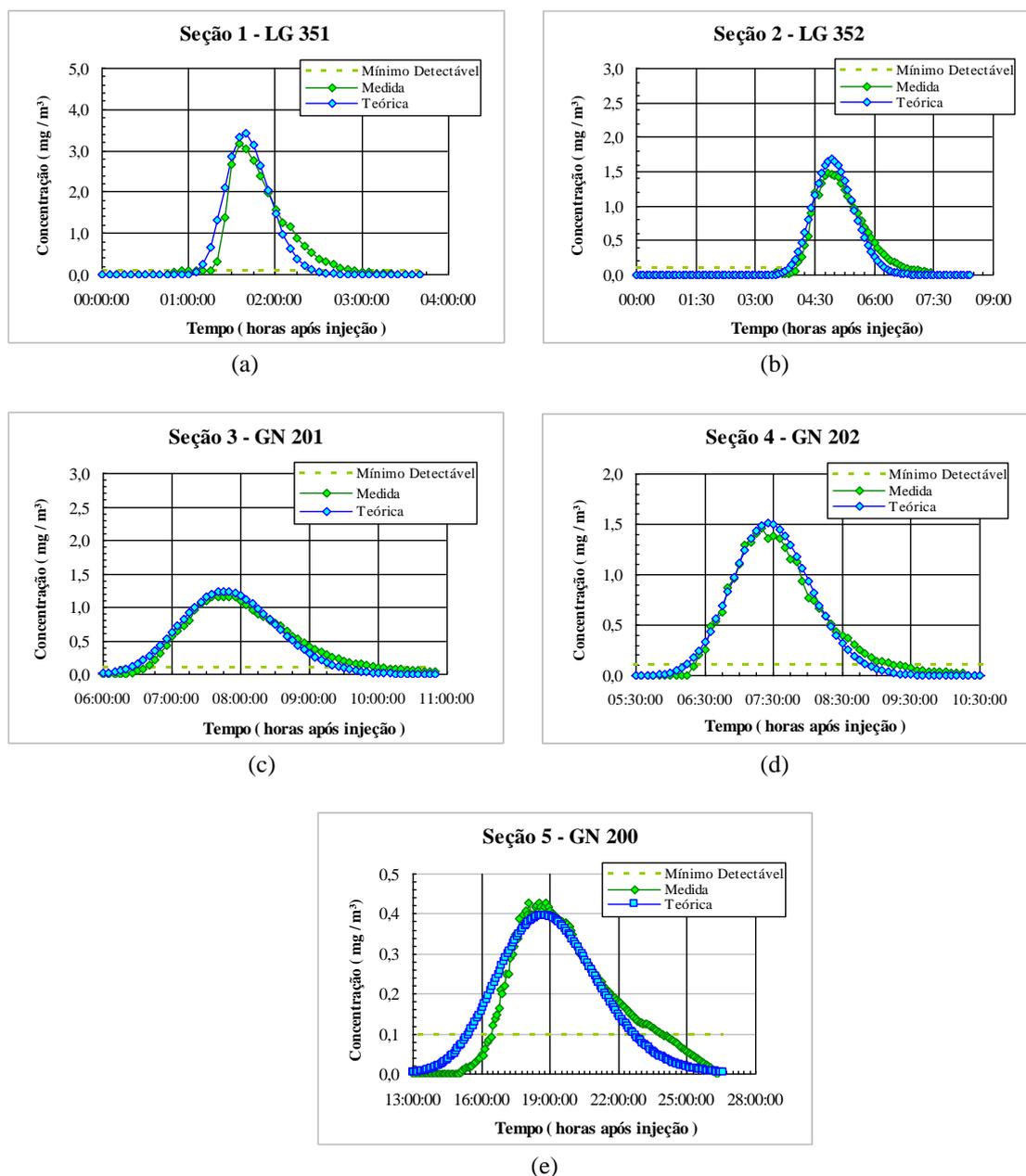


Figura 2 - (a) Seção 7 - Ponte na Via Dutra sobre o Ribeirão das Lages. (b) Seção 8 - Ponte sobre o Ribeirão das Lages em Paracambi. (c) Seção 9 - Ponte sobre o rio Guandu em Japeri. (d) Seção 10 - Ponte na Via Dutra sobre o rio Guandu. (e) Seção 11 - ETA do rio Guandu (CEDAE).

## ANEXO

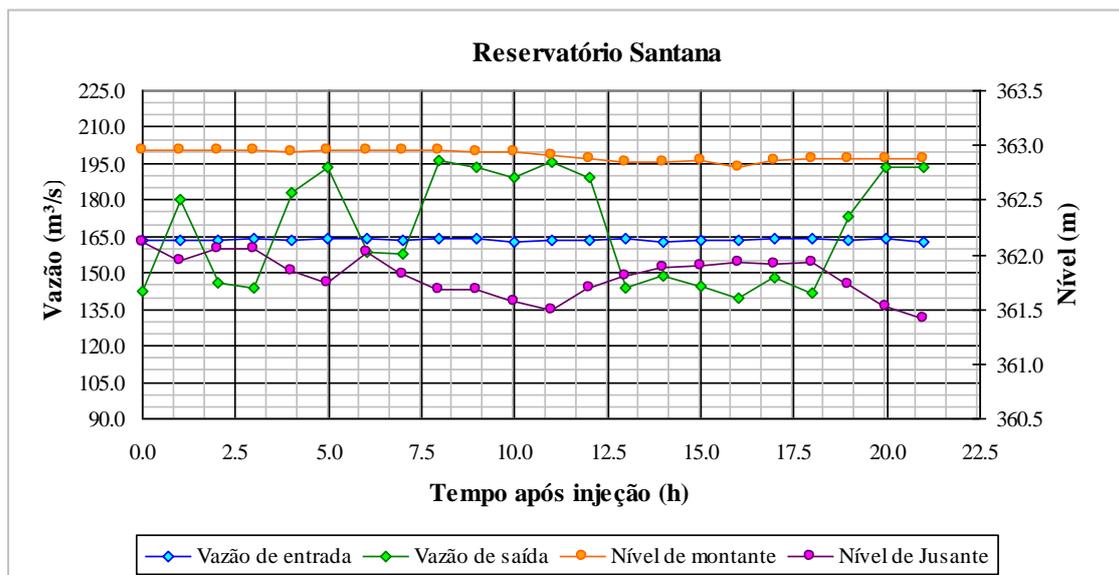
Condições hidráulicas do trecho selecionado para o estudo durante o ensaio com traçadores.

- **CAMPANHA COM TRAÇADORES REALIZADA EM 1991:**

As figuras a seguir são referentes aos dados medidos que caracterizavam as condições hidráulicas durante o ensaio com traçadores nos subtrechos onde foram realizadas as injeções, no trecho entre Santa Cecília e a ETA Guandu.

➤ **Reservatório de Santana:**

De modo a caracterizar as condições hidráulicas no Reservatório de Santana durante a realização da campanha de campo são apresentados na figura abaixo as variações temporais de níveis no reservatório e as vazões bombeadas a montante pela Elevatória de Santa Cecília e a jusante pela Elevatória de Vigário (Dados fornecidos pela LIGHT).



Fonte: COPPETEC (1991)

Figura1 – Variações de níveis no Reservatório de Santana e vazões nas estações de bombeamento de Santa Cecília e de Vigário durante a campanha com traçadores (26/02/1991 a 28/02/1991).

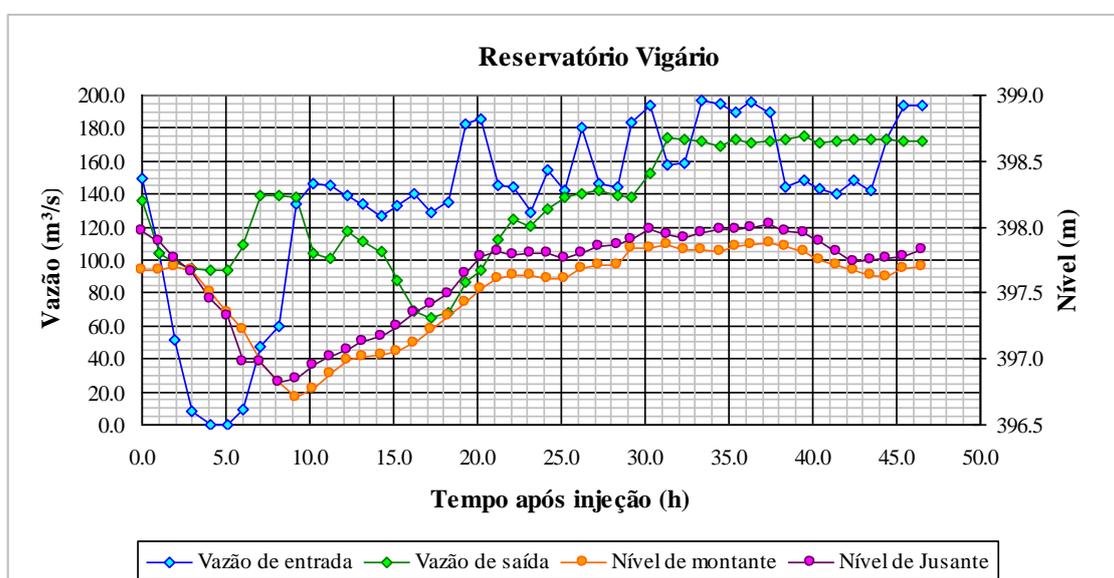
Nesta figura observa-se que o regime de bombeamento a montante e consequentemente o nível d'água de montante se mantiveram praticamente constantes em torno de 165 m³/s e da cota 363 m, respectivamente. A vazão de bombeamento a jusante

variou entre 135 e 195 m<sup>3</sup>/s, tendo o nível d'água de jusante fluando coerentemente entre as cotas 362 m e 361,5 m.

Como estas variações consideradas pequenas pode-se concluir que o regime hidráulico do Reservatório de Santana foi praticamente estacionário durante a execução da campanha de campo.

### ➤ Reservatório de Vigário:

A figura a seguir representa a condição hidráulica do subtrecho do Reservatório de Vigário medida durante a realização do ensaio com traçador.



Fonte: COPPETEC (1991)

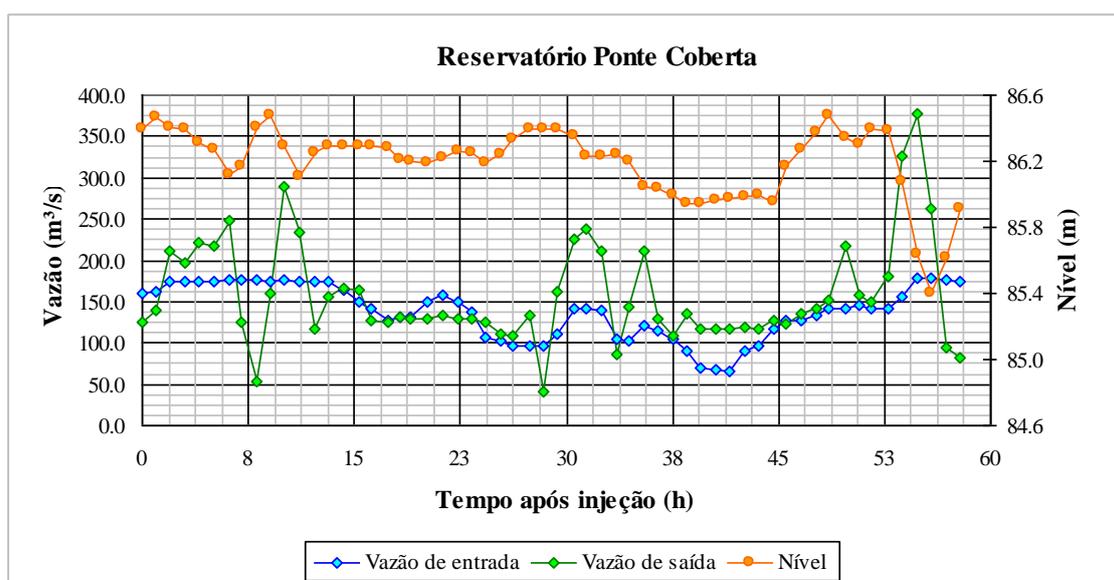
Figura 2 – Variações de níveis no Reservatório de Vigário, da vazão bombeada na Estação de Bombeamento de Vigário e da vazão turbinada pelas usinas hidroelétricas de Nilo Peçanha e Fontes, durante a campanha com traçadores.

A observação da figura acima permite constatar uma importante modificação das condições hidráulicas no Reservatório de Vigário oriundas de uma súbita parada no bombeamento de montante e uma importante redução na vazão turbinada a jusante, que se refletiram em um abaixamento de aproximadamente 1,20 m na cota de operação normal do reservatório. O fato da cota do nível de jusante ser consistentemente mais alta do que a de montante não foi devidamente esclarecido.

Esta parada de bombeamento foi devida a uma situação de emergência decorrente de um lançamento acidental de poluente supostamente oriundo da Companhia Siderúrgica Nacional. Este problema provocou aumento não quantificável no tempo de trânsito (e consequentemente uma diminuição da velocidade média de trânsito) em relação ao valor esperado para a condição de regime permanente.

➤ **Reservatório Ponte Coberta:**

A Figura 3 apresenta às variações temporais de nível d'água de jusante no reservatório, da vazão turbinada a montante pelas usinas hidroelétricas de Nilo Peçanha e Fontes e a vazão turbinada a jusante pela Usina Hidrelétrica de Pereira Passos. (Dados fornecidos pela Light).



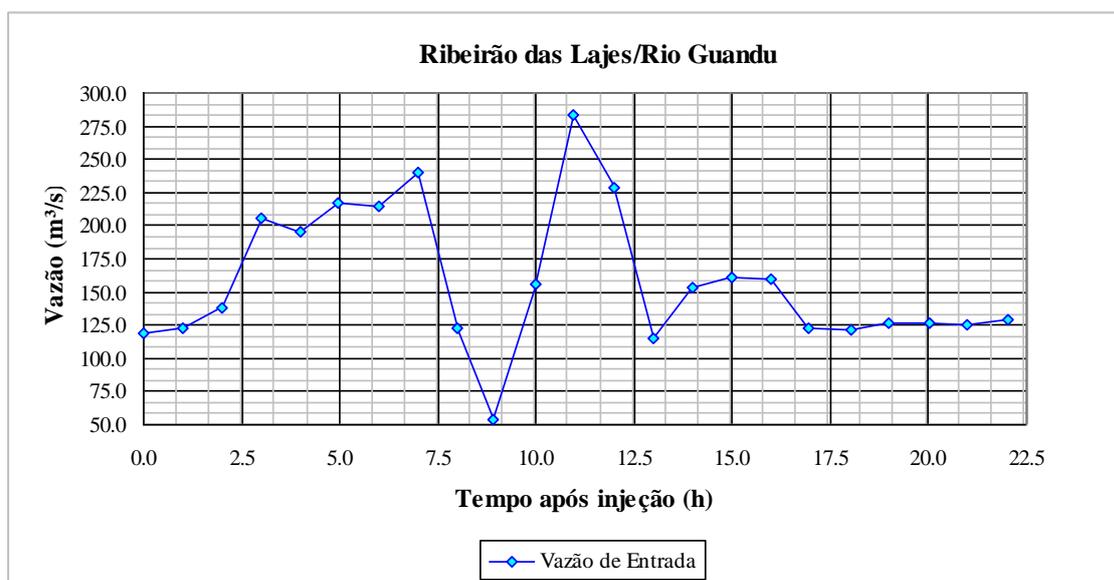
Fonte: COPPETEC (1991)

Figura 3 – Variação do nível d'água no Reservatório de Ponte Coberta, da vazão turbinada a montante nas usinas de Nilo Peçanha e Fontes e da vazão turbinada a jusante na usina de Pereira Passos.

Esta figura mostra uma flutuação acentuada na vazão turbinada (e consequentemente no nível d'água de jusante) na Usina Hidroelétrica Pereira Passos, que decorre do regime de operação típico desta usina, que opera em “regime de ponta”.

### ➤ Ribeirão das Lajes / Rio Guandu:

As condições hidráulicas deste subtrecho são fortemente dependentes da programação de geração de energia elétrica da Usina Hidroelétrica de Pereira Passos, que contribui com a maioria da vazão afluyente à ETA Guandu, onde se localiza a última seção de monitoramento deste estudo (GN 200). As variações das vazões turbinadas na usina de Pereira Passos durante a realização da campanha de campo são apresentadas na Figura 4.



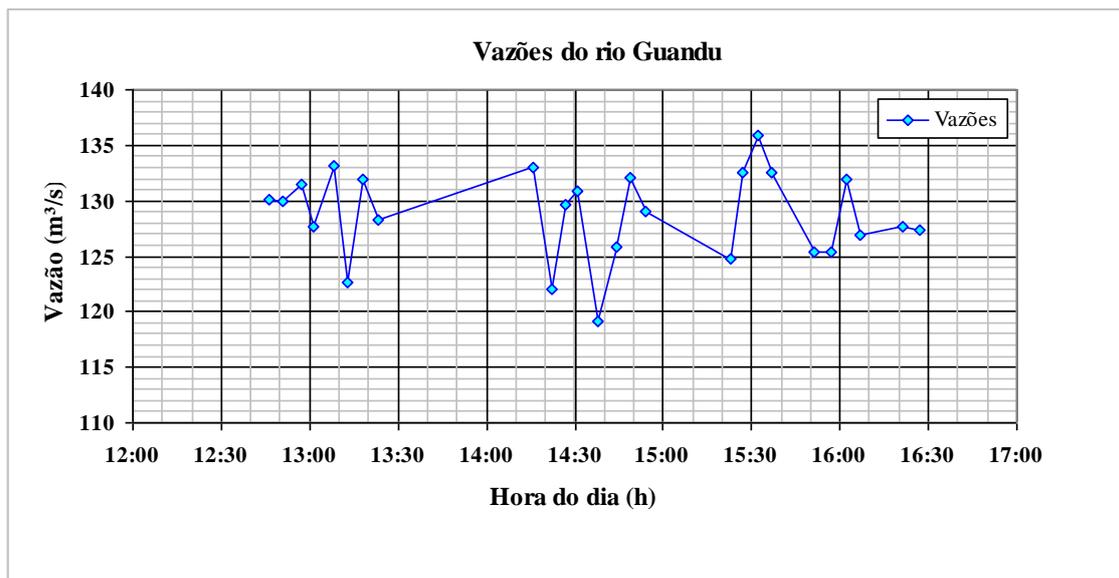
Fonte: COPPETEC (1991)

Figura 4 – Variação das vazões turbinadas na Usina Hidroelétrica Pereira Passos. (26/02/91 a 28/02/91).

As flutuações das vazões observadas na figura acima são decorrentes do regime de operação da Usina Hidroelétrica Pereira Passos, que funciona em “regime de ponta”. Como consequência é de se esperar que as curvas de passagem medidas mais a jusante sejam menos afetadas pelo regime transitório devido ao crescente amortecimento ao longo da calha dos rios.

- **CAMPANHA COM TRAÇADORES REALIZADA EM 2003:**

A figura abaixo indica a medição de vazão do rio Guandu realizadas em 25/06/2003 durante a segunda campanha com traçador, a fim de determinar a vazão média do trecho onde foi realizado a campanha em 2003, com o objetivo de obter os parâmetros de transporte e dispersão para o rio Guandu.



Fonte: COPPETEC (2003)

Figura 5 - Medições de vazões no rio Guandu realizadas em 25/06/2003.

Conforme indicado na figura acima, a vazão média considerada para a estimativa dos parâmetros de transporte e dispersão no rio Guandu foi de 129 m³/s.