

ANÁLISE DOS EFEITOS DE DESPEJOS ACIDENTAIS DE POLUENTES NO RIO GUANDU USANDO TRAÇADORES FLUORESCENTES

Jacqueline Zardo Giori¹; José Otavio Goulart Pecly²; José Paulo Soares de Azevedo³

RESUMO --- 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 do rio Guandu, situados a montante da captação da Estação de Tratamento de Água do 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. O trabalho apresenta, também, um método para a estimativa do local de ocorrência 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 --- 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 management decisions making related to the capture of water by users located 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 *in situ* experiments 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 releases. It has also provided a tool that allows to estimate, from the breakthrough curve monitored by an automatic station, the possible place of an accident and the mass distribution of the pollutant released.

Palavras-Chave – Despejo Acidental, Dispersão de Poluentes, Traçadores Fluorescentes.

¹ Engenheira Agrícola. M.Sc. em Engenharia Civil na área de Meio Ambiente pela COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro - Centro de Tecnologia – Bloco B, Sala 101 - Ilha do Fundão - CEP: 21941-914 - Fone: (21) 2270-4799 – jacquelinegiori@gmail.com

² D.Sc. em Engenharia Oceânica na área de Engenharia Costeira pela COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro – Laboratório de Traçadores - Centro de Tecnologia – Bloco B, Sala 101 - Ilha do Fundão - CEP: 21941-914 - Fone: (21) 2270-4799 – otavio@acd.ufrj.br

³ D.Sc. em Mecânica Computacional, Professor Adjunto do Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Laboratório de Hidráulica Computacional - Cidade Universitária – CEP: 21945-970 - Rio de Janeiro, RJ - Fone: (21) 25627832 – zepaulo@coc.ufrj.br

1 - INTRODUÇÃO

A água é um recurso cada vez mais escasso, seja pelo aumento da demanda devido ao crescimento populacional, seja 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.

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. 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. Como 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/INEA nos últimos anos (INEA, 2011).

Nesse contexto, o transporte rodoviário de produtos perigosos tem apresentado destaque em estudos relacionados aos impactos ambientais gerados por esta 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, o que permite, em caso de acidente, a adoção de medidas emergenciais em menor tempo (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).

Assim, a utilização de modelos numéricos na previsão de diversas situações envolvendo os recursos hídricos se constitui como uma ferramenta de apoio ao planejamento, operação e gerenciamento dos recursos hídricos uma vez que possibilitam a realização de estudos do comportamento dos corpos d'água. Como exemplo, podemos 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. Esses modelos propiciam 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 (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.

Esse 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).

Como resultado principal, apresenta-se 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 do rio Guandu, situados a montante da captação da Estação de Tratamento de Água (ETA) do Guandu, a qual é responsável pelo abastecimento de cerca de 85% da população da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

Para a simulação de acidentes nesse trecho será utilizado um modelo matemático que permite estimar a concentração do poluente no espaço e no tempo conhecido como modelo de Taylor. Considerando que esse modelo representa a injeção instantânea, será utilizada a técnica de convolução para permitir a simulação do lançamento do poluente de forma contínua no corpo hídrico.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Área de estudo

A área escolhida para a aplicação da metodologia compreende um trecho com cerca de 83 km entre a estação elevatória de Santa Cecília, na Bacia do Rio Paraíba do Sul, e a captação da Estação de Tratamento de Água (ETA) Guandu, situada na Bacia do rio Guandu (Figura 1). Esse trecho é de vital importância para o gerenciamento dos recursos hídricos do Estado do Rio de Janeiro uma vez que está situado à montante da ETA do rio Guandu a qual é responsável pelo abastecimento de água local e de 85% da população da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) (ANA, 2006).

Dessa forma, a ocorrência de acidentes com produtos perigosos nesse trecho afetaria não somente o abastecimento de água dos usuários ali instalados, mas principalmente da RMRJ abastecida pela ETA Guandu.

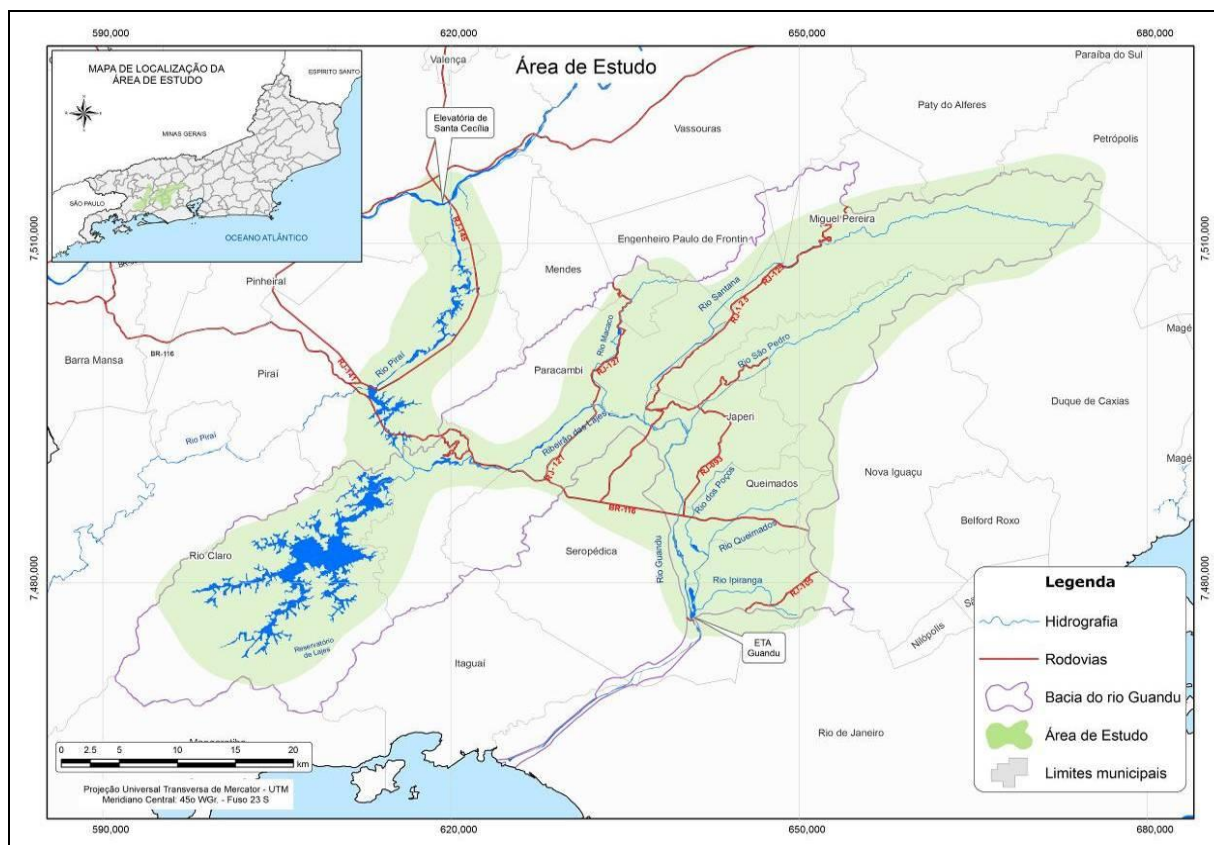


Figura 1 – Área de estudo selecionada.

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 Pirai, e do rio Pirai, no município de Pirai.

Nesse trecho, escolhido como unidade de estudo, há uma série de rodovias estaduais e federais que interceptam os corpos d'água a serem estudados. A partir de uma seleção inicial, as rodovias consideradas no presente estudo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Rodovias e rios considerados na área de estudo.

Rodovia	Rios relacionados
RJ - 125	Rios Guandu e Santana
RJ - 093	Rio São Pedro
RJ - 127	Rio dos Macacos
	Ribeirão das Lajes
RJ - 145	Rio Pirai e Rio Paraíba do Sul
RJ - 105	Rio Ipiranga
BR - 116	Rio Queimados, Rio Guandu, Rio dos Poços e Ribeirão das Lajes

Uma vez delimitada a área de estudo, foram definidos os pontos críticos de despejo acidental considerados como 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 nas rodovias consideradas neste trabalho. Do mesmo modo, os pontos de captação foram considerados como sendo 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 em estudo.

2.2 - 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 (1). O modelo é obtido a partir da solução da equação de transporte advectivo-dispersivo para o caso unidimensional e prediz que a distribuição de concentração com a distância em um dado tempo segue uma forma gaussiana (Rutherford, 1994) expressa por

$$C(x,t) = \frac{M_{inj}}{S\sqrt{4\pi D_L t}} \exp\left(-\frac{(x-Ut)^2}{4D_L t}\right) \quad (1)$$

onde:

C - concentração do constituinte (M/L³);

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

S - seção transversal do escoamento (L²);

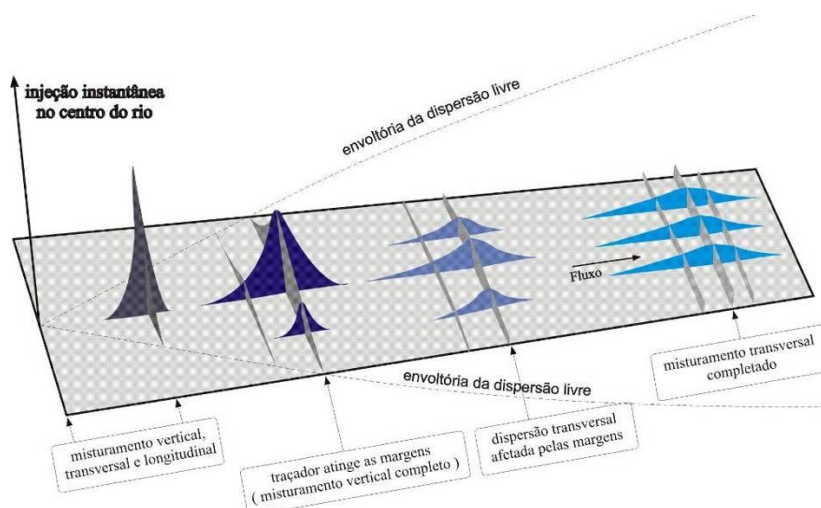
D_L - coeficiente de dispersão longitudinal (L²/T);

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).

Embora derivada originalmente para escoamentos permanentes e uniformes, a equação (1) 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 ajuste de uma solução analítica aos dados experimentais obtidos *in situ* (Fisher, 1979).

No entanto, possui algumas restrições para ser aplicada, uma vez que apresenta uma simplificação do que ocorre na natureza. 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 2 é uma representação esquemática dessa condição indicada pela mistura vertical e transversal completa.

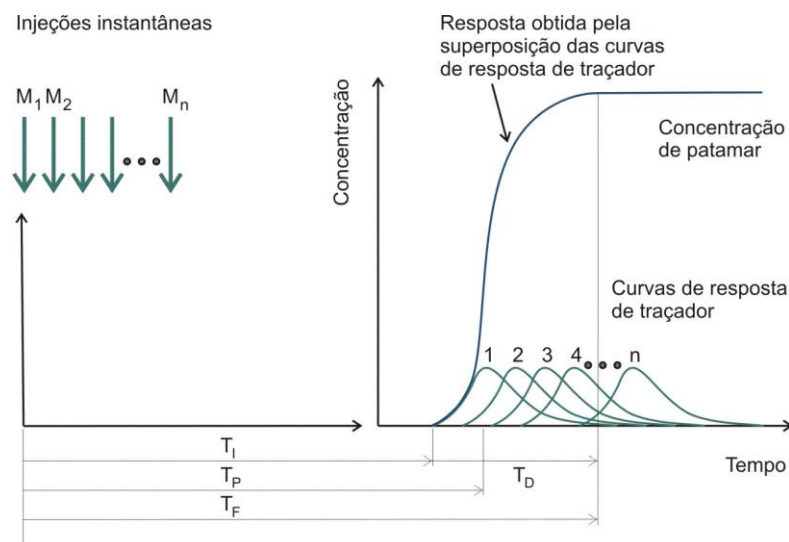


Fonte: Adaptado de Hubbard *et al.* (1982).

Figura 2- Representação esquemática do processo de mistura em rios e da distância de boa mistura.

Além disso, deve ser aplicado à 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.

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. 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. Para o presente estudo foi considerado o lançamento do poluente de forma contínua no corpo hídrico. Para isso, foi utilizado o conceito da convolução aplicada a sistemas lineares, o que permitiu que lançamentos instantâneos fossem sobrepostos e assim obtida uma função que representa a injeção contínua de poluente. A Figura 3 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 3 – Representação esquemática da superposição das curvas de resposta do traçador a partir de injeções instantâneas.

2.3 - Uso de traçadores na caracterização do rio Guandu

Na área delimitada como unidade de estudo, foi realizado no período de 25/06/2003 a 02/08/2003, um ensaio de campo com uso de traçadores fluorescentes para determinar experimentalmente as características de transporte e dispersão em condições de vazões de estiagem para o rio Guandu, as quais serão utilizadas para a simulação dos cenários neste trabalho.

O ponto inicial de monitoramento foi o canal de fuga da Usina Hidrelétrica 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 2 apresenta as características das seções de injeção e monitoramento do ensaio realizado cuja localização está indicada na Figura 4.

Tabela 2 - 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)

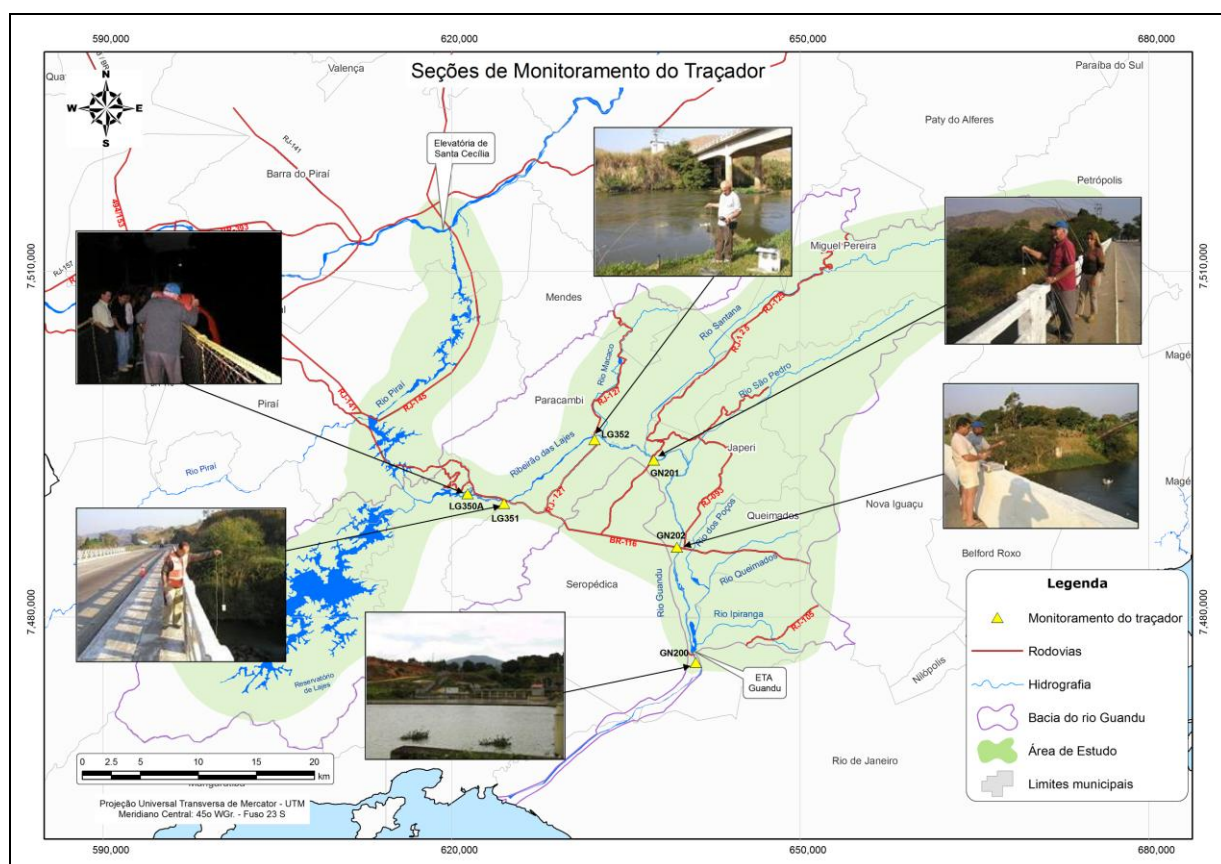


Figura 4 – Localização das seções de monitoramento do traçador no ensaio de campo.

Foram realizadas duas injeções de traçador fluorescente no rio Guandu visando à determinação experimental de suas características de transporte e de diluição em época de estiagem. Para isso, foi utilizado o corante Amidorondamina G, também conhecido por “Acid Red 50”, substância conservativa e altamente solúvel em água. A injeção desse corante ocorreu sempre de forma instantânea no corpo hídrico. Na Tabela 3 são apresentados os dados das duas injeções realizadas no rio Guandu e na Tabela 4 é apresentada a síntese dos resultados obtidos nessa campanha.

Tabela 3 - 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 4 – 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)

3 - CENÁRIOS SIMULADOS

Os cenários de simulação foram 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.

Neste trabalho foram propostos dois cenários para a simulação do transporte do poluente no rio Guandu, 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. 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.

3.1 - Cenário I

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 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 do ensaio *in situ* com traçadores fluorescentes.

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 5) 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 sobre o possível acidente.

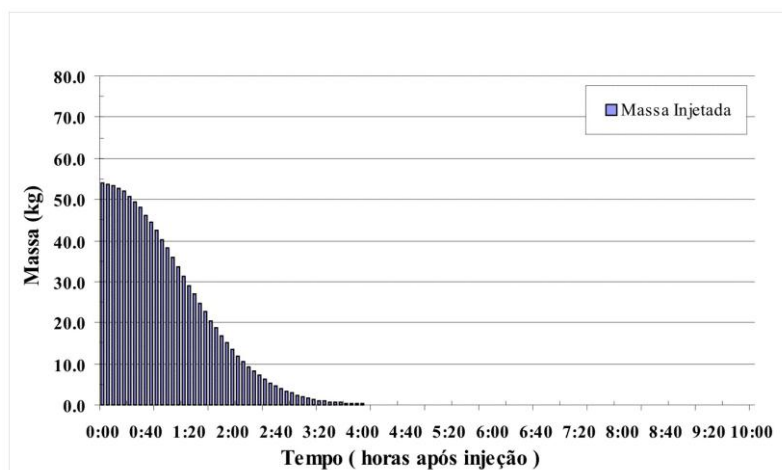


Figura 5 - Representação da distribuição da massa em função do tempo.

Os parâmetros de transporte e dispersão de poluentes utilizados, para a simulação deste cenário, foram determinados no ensaio com traçadores descrito anteriormente. 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 esse cenário foram ainda consideradas três situações de vazão: mínima, média e máxima.

Os valores típicos de vazão para esse 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 m³/s, 160 m³/s e 240 m³/s, respectivamente, conforme apresentado na Figura 6. 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.

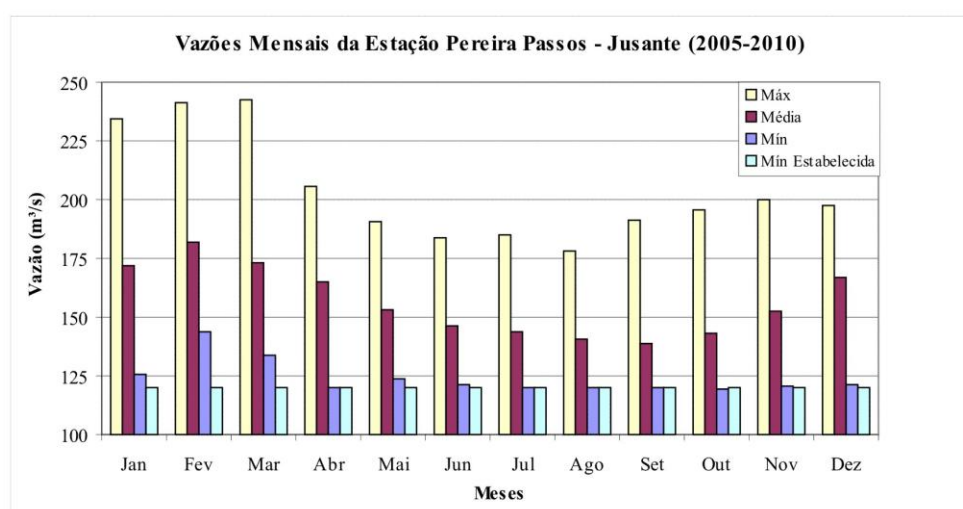


Figura 6 - Histograma das vazões mensais máximas, médias e mínimas no período de 2005 a 2010.

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 7.

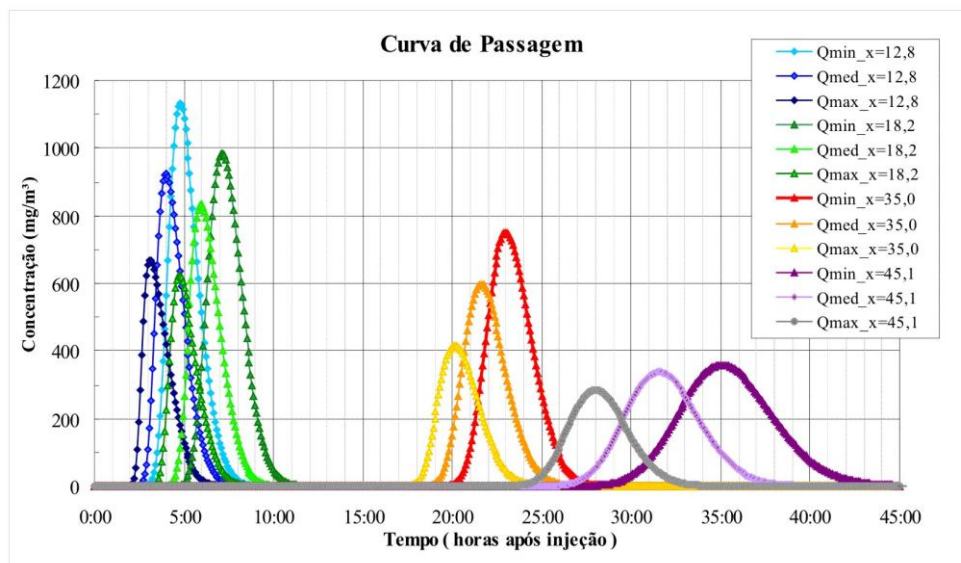


Figura 7 - Curva de passagem para todas as vazões nas diferentes distâncias.

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 8, na Figura 9 e na Figura 10 são apresentadas as curvas de passagem para as vazões mínima, média e máxima separadamente. Uma síntese dos principais resultados obtidos para o cenário simulado nesse estudo está apresentada na Tabela 5.

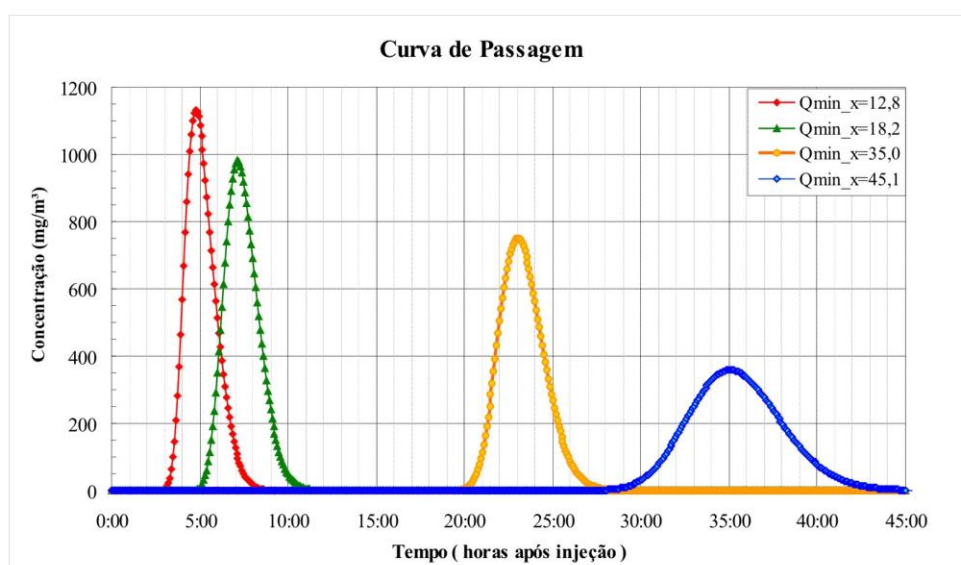


Figura 8 - Curvas de passagem para a situação de vazão mínima ($120 \text{ m}^3/\text{s}$) nas diferentes seções de captação.

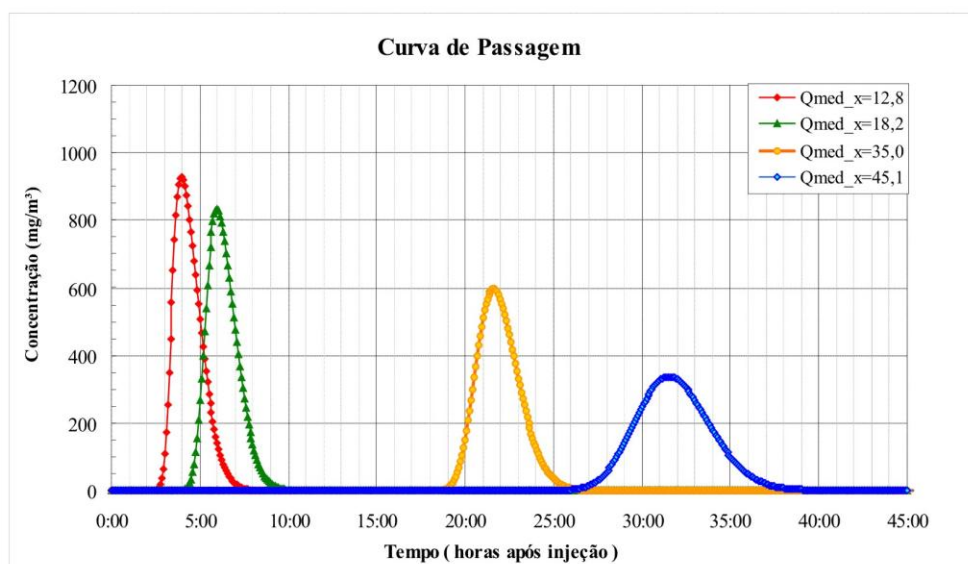


Figura 9 - Curva de passagem para a situação de vazão média (160 m³/s) nas diferentes seções de captação.

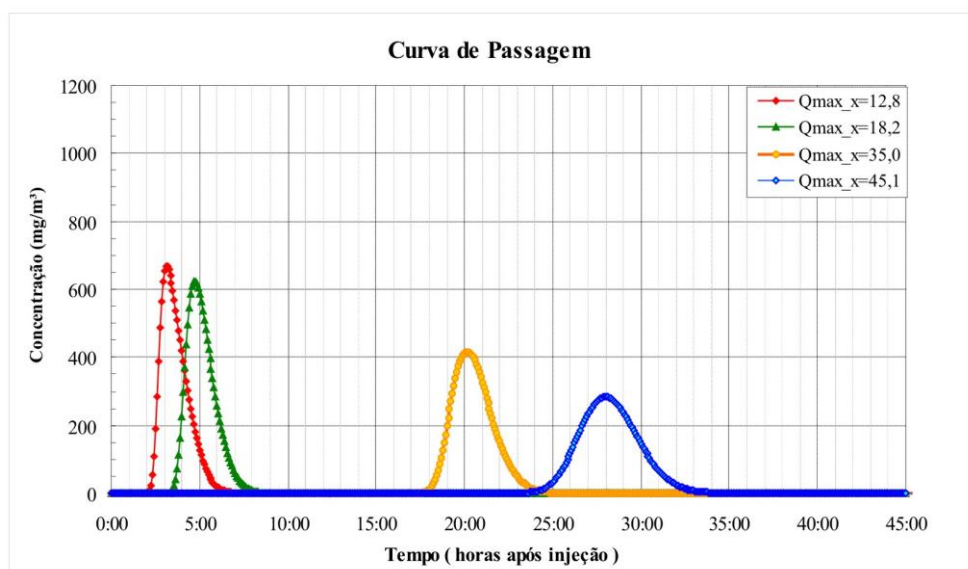


Figura 10 - Curva de passagem para a situação de vazão máxima (240 m³/s) nas diferentes seções de captação.

Tabela 5 - Resultado do cenário simulado.

Distância (km)	Vazão (m ³ /s)	Conc. Máxima (mg/m ³)	Tempo Início (h)	Tempo Final (h)	Tempo de Passagem da Curva (h)
12,8	Qmin	1131,6	02h35	09h55	07h20
	Qmed	926,3	02h15	08h40	06h25
	Qmax	668,2	01h50	07h30	05h40
18,2	Qmin	984,0	04h10	12h55	08h45
	Qmed	832,9	03h40	11h05	07h25
	Qmax	623,2	03h00	09h20	06h20
35,0	Qmin	750,2	18h55	30h15	11h20
	Qmed	597,7	18h05	28h25	10h20
	Qmax	417,0	17h05	26h40	09h35
45,1	Qmin	358,4	25h40	48h05	22h25
	Qmed	337,3	24h00	42h10	18h10
	Qmax	284,9	22h10	37h05	14h55

Analisando as figuras apresentadas e os resultados da Tabela 5, 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 com o aumento da vazão e à medida que as distâncias até os usuários de interesse aumentam em relação ao local de lançamento.

Para a condição de vazão mínima ($120 \text{ m}^3/\text{s}$) no trecho analisado (Figura 8), a concentração máxima atingida pelo poluente foi de $1.131,6 \text{ mg/m}^3$ 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 para a ETA Guandu, maior usuário deste trecho com captação de água correspondente a $45 \text{ m}^3/\text{s}$, situada a 45,1 km do ponto de lançamento do poluente, obteve-se uma concentração máxima de $358,4 \text{ mg/m}^3$ 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 a condição de vazão média ($160 \text{ m}^3/\text{s}$), essa pluma de poluente atingiria a ETA Guandu cerca de 24 horas após seu lançamento enquanto para a condição de vazão máxima ($240 \text{ m}^3/\text{s}$) 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.

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. No estudo de Costa e Araujo (1980), 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 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 desse cenário.

Tabela 6 – Síntese dos resultados apresentados por Costa e Araujo (1980).

Nº	Seção	Ensaio com traçador		Costa e Araujo (1980)		
		$U \text{ (m/s)}$	$D_L \text{ (m}^2/\text{s)}$	$U \text{ (m/s)}^1$	$D_L \text{ (m}^2/\text{s)}^2$	$D_L \text{ (m}^2/\text{s)}^3$
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

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

² Coeficiente de dispersão longitudinal para as seções estudadas.

³ Valor médio de coeficiente de dispersão determinados para cada trecho.

Os valores contidos na Tabela 6 foram utilizados para as simulações da curva de passagem na ETA Guandu cujos resultados são apresentados na Figura 11 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 nesta seção para uma vazão de 160 m³/s.

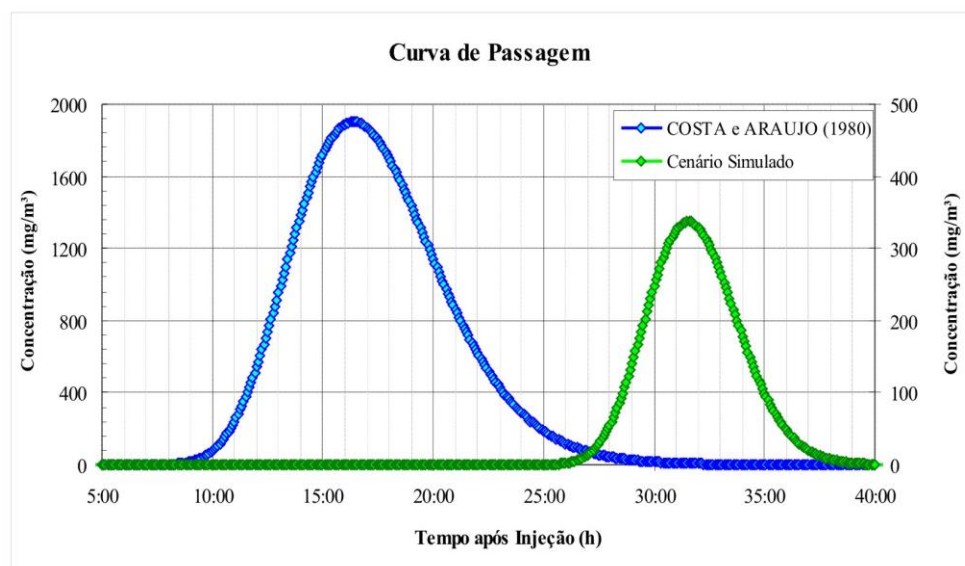


Figura 11 – Comparação da curva de passagem apresentada no trabalho de Costa e Araujo (1980) com curva simulada nesse trabalho.

O resultado encontrado por Costa e Araujo (1980), conforme observado na Figura 11, 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.

3.2 - Cenário II

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 devido a alguma instalação industrial 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 12, 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.

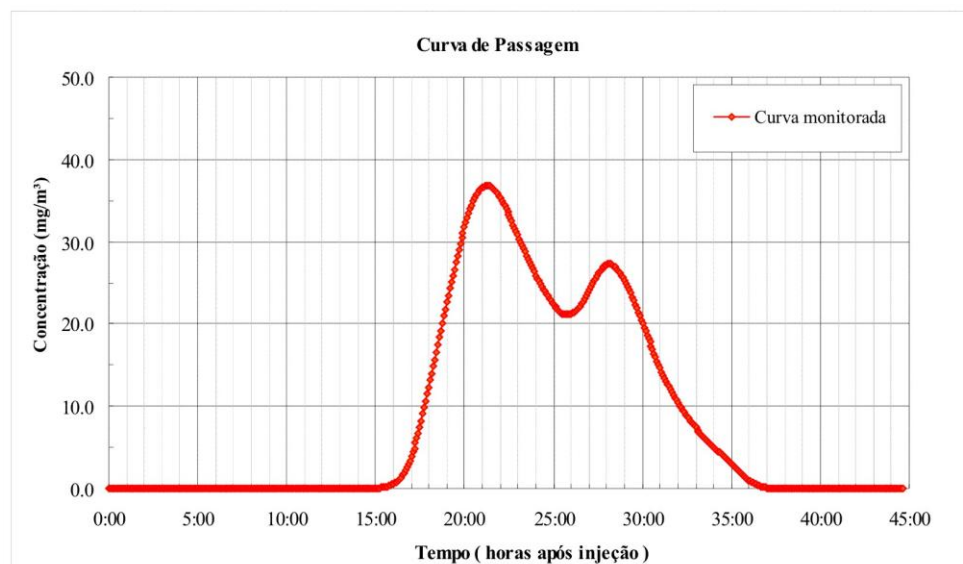


Figura 12 – Curva observada na estação de monitoramento de qualidade de água para um possível acidente simulado.

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 ± 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 13).

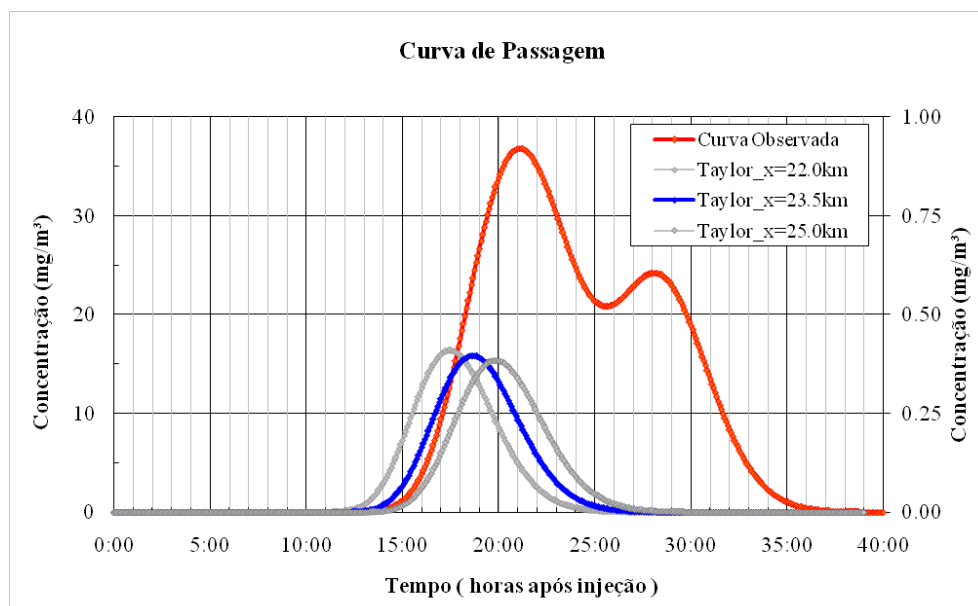


Figura 13 – Comparação da curva de passagem do traçador na ETA Guandu com a curva monitorada.

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 14 e corresponde a uma massa lançada de 175 kg distribuída por aproximadamente 11 horas.

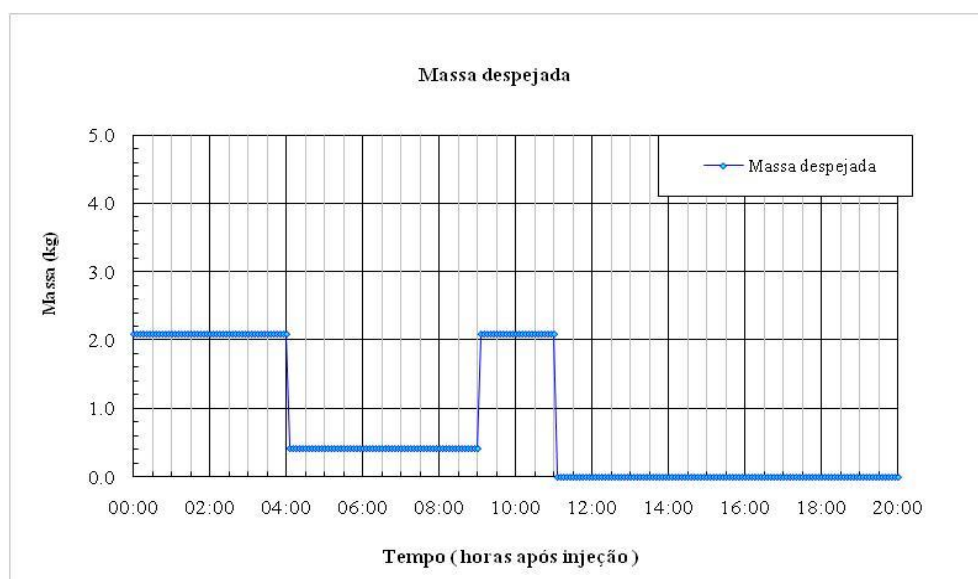


Figura 14 – Distribuição de massa do poluente derramado no corpo hídrico a uma distância de 23,5 km a montante da seção de controle.

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 14.

O uso desse método permitiu estimar a distância e distribuição de massa de um lançamento de 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.

4 - 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. Entretanto, a metodologia apresentada é mais abrangente podendo ser utilizada na simulação de acidentes devidos a fontes localizadas e cujo lançamento ocorre de modo instantâneo ou variável no tempo.

Nos cenários propostos, a técnica de traçadores foi utilizada como um simulador para um acidente de poluição, sendo possível descrever a pluma do poluente com melhor precisão comparável a outros métodos. O primeiro cenário foi desenvolvido 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 segundo 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.

Os tempos característicos da pluma de poluente variam com a mudança do comportamento hidráulico do trecho, ou seja, quanto menor a vazão maior é o tempo de duração da curva de passagem. 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 líquida, maior é a concentração máxima do poluente no rio e consequentemente maiores os prejuízos ao ambiente e à população.

Para o cenário I os resultados obtidos indicam que os tempos das curvas de passagem da substância na seção 1 (UTE Paracambi) tiveram início às 02h35, 02h15 e 01h50, e término às 09h55, 08h40 e 07h30 horas após o lançamento do poluente para as vazões mínima, média e máxima, respectivamente. Para a seção 2 (Duke Energy), os tempos de início e término da pluma de poluente para a vazão mínima foram de 04h10 e 12h55; para a situação de vazão média esses tempos foram de 03h40 e 11h05; para vazão máxima o tempo de início da curva de passagem foi de 03h00 horas com término às 09h20 horas após o lançamento do poluente. Para a seção 3 (Eletrobolt), esses tempos característicos da curva de passagem tiveram início às 18h55, 18h05 e

17h05 e término às 30h15, 28h25 e 26h40, correspondente às vazões mínima, média e máxima, respectivamente. Já para a seção 4, correspondente a ETA Guandu, as curvas de passagem do poluente tiveram início às 25h40, 24h00 e 22h10 e término às 48h05, 42h10 e 37h05 para as vazões mínima, média e máxima indicando aos diversos usuários no rio Guandu o comportamento do poluente ao longo do tempo. Esses resultados obtidos estão de acordo com as curvas de passagem medidas *in situ* na campanha de campo realizada.

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.

No cenário II, 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.

A metodologia proposta mostrou-se eficiente na simulação do transporte do poluente solúvel para o trecho de curso d'água selecionado, permitindo a quantificação do tempo de passagem e da concentração para o lançamento proposto. Assim, a metodologia representa um mecanismo de alerta em situações de despejo de substâncias perigosas no trecho do curso d'água em estudo.

Embora nesse trabalho os cenários tenham sido realizados apenas para o despejo acidental de poluentes como consequência de acidentes no transporte rodoviário de produtos perigosos, recomenda-se que a simulação seja aplicada ao despejo proveniente de diversas origens, como lançamentos de poluentes industriais e de estações de tratamento. Contudo, para isso, faz-se necessário a definição das atividades potencialmente poluidoras estabelecidas às margens do trecho analisado.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro dado para a elaboração deste trabalho. Ao Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ pelos dados fornecidos do ensaio com traçadores na área de estudo. E a Gerência de Serviços de Operação e Manutenção de Usinas – LIGHT ENERGIA S.A. pela disponibilidade dos dados hidráulicos utilizados.

BIBLIOGRAFIA

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.

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.

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.

BOYD, C. E. (2000). *Water Quality: An Introduction*. Kluwer Academic Publishers. Massachusetts.

BÜGE, T. R. (1990). “*Modelo matemático para simulação de transporte e dispersão de poluentes em rios: aplicação ao estudo de lançamento accidental 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.

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.

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.

GUSMÃO, A. C. F. (2002). *O controle e a prevenção da poluição accidental no transporte rodoviário de produtos perigosos: Ação aplicada no Estado do Rio de Janeiro*. Dissertação de M.Sc., PEAMB/UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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 – RJ, Brasil.

KILPATRICK, F.A., COBB, E.D. (1985). “*Measurement of Discharge Using Tracers*”. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter A16.

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

LIMA, C. 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, Foz do Iguaçu. Anais eletrônicos: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo. ABES, p. 2534-2545.

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.

RUTHERFORD, J. C. (1994). *River Mixing*, John Wiley & Sons, Chichester, England.

SCHNOOR, J. L., *Environmental Modelling Fate and Transport of Pollutant in Water, Air and Soil*, John Willey and Sons, 1996.

TAYLOR, G. I. (1954). “*Dispersion of matter in turbulent flow through a pipe*”. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 223, 446–468, 1985.