

Avaliação da Capacidade de Transporte e Dispersão do Rio Paraibuna Utilizando Traçadores Fluorescentes. Trecho: Distrito Industrial a UHE Marmelos – Juiz de Fora/MG

José Homero Pinheiro Soares, Ana Cristina Junqueira Ribeiro

UFJF, ESA, Juiz de Fora/MG

homero.soares@ufjf.edu.br, anac.eng@gmail.com.

Hugo Alexandre Soares Guedes

DEA/UFV

hugo.guedes@ufv.br

Recebido: 18/07/08 – revisado: 15/04/10 – aceito: 24/08/10

RESUMO

Este trabalho apresenta a síntese das atividades desenvolvidas e os resultados obtidos durante os estudos realizados para determinação in situ das características de transporte e dispersão do Rio Paraibuna com o uso de traçadores fluorescentes. Foram realizadas duas campanhas de campo para diferentes vazões, utilizando os corantes fluorescentes Uranina ou Fluoresceína Sódica (Acid Yellow 73, Color Index 45350) e Amidorodamina G Extra (Acid Red 52, Color Index 45220), injetados instantaneamente no Rio Paraibuna próximo ao Distrito Industrial de Juiz de Fora. O trecho estudado de 27 km, localizado entre o Distrito Industrial I e a Usina Hidrelétrica de Marmelos Zero, foi monitorado coletando-se amostras de água em cada uma das quatro seções de controle, com o objetivo de se determinar as variações temporais das concentrações de traçador (Curvas de Passagem) ao longo do rio. Os parâmetros de dispersão e transporte foram determinados utilizando-se o Modelo de Taylor. Foram estabelecidas as relações entre o Coeficiente de Dispersão (D_L) e Velocidade Média (U) medidos com as vazões transitantes no Rio Paraibuna.

Palavras Chave: Transporte, dispersão, traçadores fluorescentes.

INTRODUÇÃO

Os modelos de qualidade de água têm sido amplamente utilizados, entre outras aplicações, na previsão da distribuição temporal e espacial de concentrações de poluentes ao longo de cursos de água devido a causas diversas. O conhecimento das características de transporte e dispersão de poluentes solúveis em águas superficiais torna-se fundamental para a implementação daqueles modelos (Holley, 1986; Barbosa Jr. et al, 2005), em especial nos casos que contemplam o estudo de poluição acidental ou intencional, na busca da seção mais adequada de lançamento de efluentes em corpos hídricos, ou, ainda, quando se pretende definir níveis adequados de tratamento do efluente compatíveis com a qualidade de água exigida para o corpo receptor (instrumentos de comando-e-controle associados ao enquadramento de corpos hídricos).

A utilização de fórmulas empíricas para avaliação de parâmetros hidrodinâmicos, Coeficiente de Dispersão Longitudinal e Velocidade Média, frequentemente conduz a resultados bastante divergentes devido a imprecisões inerentes a cada uma delas. Para evitar esses problemas, é importante a realização de medições *in situ* utilizando traçadores que simulam poluentes solúveis. No Brasil, existem inúmeros casos em que traçadores radioativos (Gomez, 1991) e fluorescentes (Roldão e Soares, 1989; Roldão et al., 1991; Soares et al., 1996; Soares e Ribeiro, 2000) foram empregados para se medirem, em campo, as características locais de transporte e dispersão. Os traçadores fluorescentes simplificam, sobremaneira, os problemas logísticos, reduzindo ainda os custos envolvidos. Ademais, evitam-se preocupações relacionadas à segurança radiológica decorrente da utilização de radiotraçadores.

O Rio Paraibuna, localizado na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, recebe direta ou indiretamente, ao banhar a região de Juiz de Fora, uma

considerável carga de poluentes orgânicos provenientes de, aproximadamente, 600.000 habitantes, além daquela advinda de uma extensa gama de atividades industriais. Esses despejos têm provocado a degradação da qualidade de suas águas tornando-as, ao longo do trecho monitorado, praticamente inúteis ao desenvolvimento de vida aquática, bem como impossibilitando uma série de outros usos do recurso hídrico, potenciais fontes de ganhos econômicos e de qualidade de vida para a municipalidade.

O conhecimento da capacidade do rio em diluir e transportar poluentes é extremamente importante uma vez que permite prever, através de modelagem matemática, as concentrações de poluentes ao longo do trecho estudado em caso de lançamentos acidentais. Esse tipo de conhecimento é parte da construção de informações quantitativas e qualitativas, técnicas, econômicas, sociais, culturais, dentre muitas outras, que asseguram a sustentabilidade da gestão de recursos hídricos preconizada pela Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei 9.433/1997, e que tem como unidade de gestão a própria bacia hidrográfica.

OBJETIVOS

O objetivo mais amplo dos estudos desenvolvidos foi contribuir para a construção de informações quantitativas sobre o Rio Paraibuna e sua bacia hidrográfica, em especial àquelas relacionadas à sua capacidade de transporte e dispersão de poluentes.

O foco do objetivo mais amplo, considerado como principal objetivo do estudo, foi avaliar *in situ* as características de transporte e dispersão do Rio Paraibuna entre o Distrito Industrial I e a Usina Hidrelétrica de Marmelos Zero, através da quantificação dos Coeficientes de Dispersão (D_L) e Velocidades Médias (U) de transporte para duas vazões distintas.

São considerados objetivos específicos deste trabalho:

- Complementar três estudos realizados no Rio Paraibuna no decorrer dos anos de 1996 e 1997, que dizem respeito ao conhecimento das variações das características hidrodinâmicas (D_L e U) com as vazões pesquisadas;
- Obter as vazões em escoamento no Rio Paraibuna durante as duas campanhas de

campo, em todas as seções de monitoramento, com a utilização de traçadores;

- Comparar o desempenho dos traçadores utilizados no que se refere à quantificação de parâmetros de transporte e dispersão e de vazões em escoamento; e
- Relacionar os parâmetros hidrodinâmicos D_L e U com a vazão transitante no Rio Paraibuna.

TRAÇADORES

Denomina-se traçador a qualquer substância ou produto que incorporado à massa de outra substância permite estudar seu comportamento em relação a um determinado processo físico ou químico (Bedmar, 1972).

São duas as propriedades mais fundamentais que caracterizam uma substância como traçador. A primeira diz respeito a que o comportamento do traçador deve ser idêntico ao do meio estudado. Desta forma, as características dinâmicas da massa serão reproduzidas fielmente. A segunda refere-se a uma propriedade intrínseca do traçador utilizado que permite detectá-lo no meio ao qual foi incorporado. Pode-se citar, como exemplo, a emissão de luz dos traçadores fluorescentes, a emissão de partículas ou a energia dos traçadores radioativos.

Segundo Bedmar (1972), o traçador ideal, quanto à aplicação em hidrologia, deve ter um comportamento idêntico à água, além de não reagir com ela. Deve ser conservativo, possuir baixas concentrações naturais no meio, além de ser de fácil detecção, baixo custo e inócuo aos seres vivos.

Traçadores fluorescentes são substâncias orgânicas empregadas como corantes, sobretudo na indústria têxtil, comercializadas na forma de pó. Essas substâncias apresentam a propriedade de emitir luz numa certa faixa de comprimentos de onda, quando excitadas em outra faixa de menores comprimentos de onda, às quais são sensíveis.

A utilização de traçadores é de fundamental importância em estudos hidrológicos e hidrogeológicos uma vez que as quantificações hidrodinâmicas realizadas *in situ* não podem prescindir dessas substâncias já que servem como instrumental para simular o aporte de poluentes de forma acidental ou proposital, em águas superficiais ou subterrâneas (Benischke, 1989).

Os derramamentos acidentais de produtos químicos contribuem para a degradação do meio,

principalmente no que diz respeito aos recursos hídricos superficiais. Esses acidentes podem ser causados por transporte de cargas perigosas, ou, o que é mais comum, por indústrias que lançam seus efluentes líquidos diretamente nos corpos de água. Assim sendo, na tentativa de mitigar as consequências advindas da dispersão desses produtos no meio líquido, há necessidade de prever a chegada da nuvem de poluente, com a maior brevidade possível, em sítios importantes situados a jusante do local do derramamento, tais como: tomadas de água para abastecimento público, industrial, derivações de rios, entre outros.

Os traçadores fornecem os subsídios necessários para as avaliações dos tempos característicos, entendidos como: o tempo de início da passagem da nuvem de poluente por determinado sítio de controle, o tempo correspondente a sua máxima concentração naquele sítio bem como o tempo a partir do qual suas concentrações podem ser consideradas inócuas à saúde pública e à vida aquática local. Esses tempos são quantificados através dos parâmetros de dispersão e transporte, que, por seu turno, são utilizados como parâmetros de entrada de modelos matemáticos que prognosticam a variação temporal das concentrações de poluentes em seções de controle.

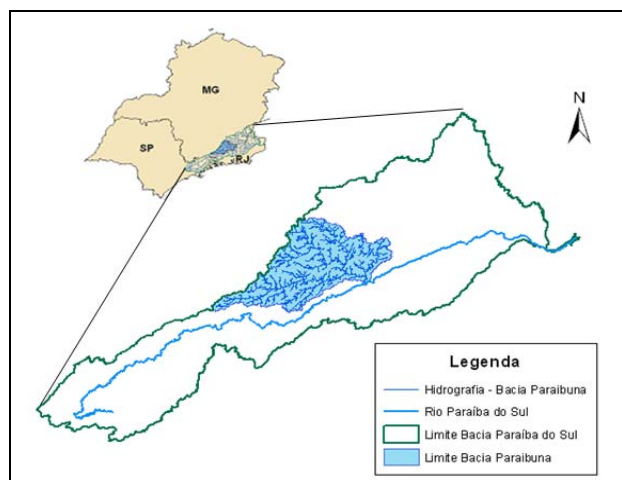


Figura 1 – Localização ilustrativa da bacia hidrográfica do Rio Paraibuna em relação à bacia do Rio Paraíba do Sul e aos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

A necessidade de determinar a área de drenagem, áreas de proteção de mananciais (fontes e poços), tempos de trânsito em cursos de água para previsão de inundações, os tempos de residências em reatores biológicos piloto ou operacionais, com objetivo de quantificar seu desempenho em termos

de qualidade de efluente tratado, medidas de vazões em canais abertos ou em tubulações industriais, parâmetros hidrodinâmicos em rios e lagos, fazem dos traçadores substâncias bastante utilizadas em estudos relacionados aos recursos hídricos.

Os trabalhos desenvolvidos no Rio Paraibuna foram realizados utilizando-se os traçadores fluorescentes Uranina, também conhecido como Fluoresceína Sódica (Acid Yellow 73, *Color Index* 45350) e Amidorodamina G Extra (Acid Red 52, *Color Index* 45220), em função de apresentarem requisitos importantes para avaliações hidrodinâmicas em águas superficiais, bem como por serem largamente empregados em avaliações similares à desenvolvida neste trabalho (Roldão e Soares, 1989; Roldão, 1991; Roldão et al., 1995).

METODOLOGIA

Localização da área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Paraibuna é formada por três rios principais: o Paraibuna, o Cágado e o Peixe. O Paraibuna nasce na serra da Mantiqueira, a 1.200 m de altitude e, depois de percorrer 166 km, lança-se à margem esquerda do Rio Paraíba do Sul, a 250 m de altitude. A declividade média da bacia é de $3,64 \text{ m km}^{-1}$, seu índice de compactidade é de 1,70 e seu fator de forma igual a 0,22. A bacia ocupa em Minas Gerais uma área de aproximadamente 5.200 km^2 , o que corresponde a, aproximadamente, 9% da área total da bacia do Rio Paraíba do Sul (Soares et al., 1998).

O Rio Paraibuna estende-se, em sua maior parte, pelo Estado de Minas Gerais, drenando também o Estado do Rio de Janeiro. Em Minas Gerais, o rio localiza-se entre os meridianos de $42^\circ 53'$ e $44^\circ 08'$ de longitude oeste (W) e entre os paralelos de $21^\circ 25'$ e $22^\circ 07'$ de latitude sul (S). A parte mineira do Rio Paraibuna possui, aproximadamente, 82% de sua superfície dentro da zona da mata e o restante na zona sul do Estado de Minas Gerais.

Na Figura 1 está apresentada a localização da bacia hidrográfica do Rio Paraibuna em relação à bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e os Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

O trecho estudado compreende 27 km do Rio Paraibuna localizado entre o Distrito Industrial I do município de Juiz de Fora, situado no bairro Benfica, e a Usina Hidrelétrica de Marmelos Zeros, localizada no bairro Retiro. A seleção desta área teve como finalidade estudar o trecho do rio caracterizado por três regiões distintas: área industrial, área

intensamente urbanizada e área com baixa densidade demográfica e pouco urbanizada.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo das localizações das cinco seções de monitoramento de traçador estabelecidos durante os trabalhos de campo e na Figura 2 é apresentado o mapa georreferenciado com as seções de monitoramento. Cabe ressaltar que, a seção denominada Krambeck (seção S2), situada sobre a ponte do Rio Paraibuna, no Bairro São Dimas, somente foi utilizada para determinar a curva de passagem de traçador na segunda campanha de campo.

Tabela 1 – Síntese dos dados das seções de injeção e monitoramento.

Seções	Coordenadas UTM	Distância Acumulada (km)	Denominação
S0	(661307; 7602540)	0,0	Injeção
S1	(665622; 7597640)	7,6	Represa
S2	(668436; 7595212)	12,1	Krambeck
S3	(671189; 7593382)	16,0	Pontilhão
S4	(673166; 7590816)	20,0	Posto Policial
S5	(674699; 7589802)	27,0	UHE Marmelos

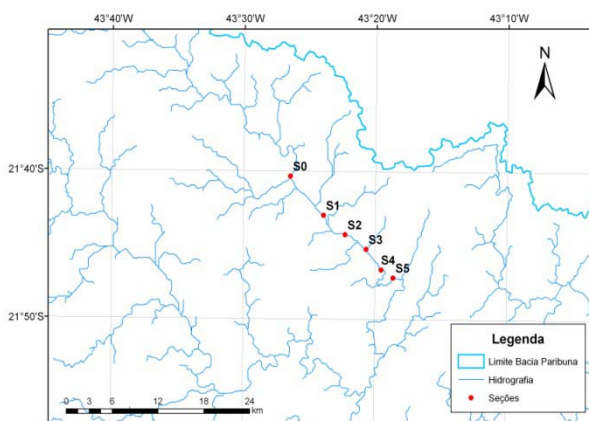


Figura 2 – Localização ilustrativa das seções de monitoramento no Rio Paraibuna.

As seções de monitoramento tiveram suas localizações determinadas em função dos seguintes aspectos:

- Homogeneidade dos trechos monitorados;
- Existência da seção de amostragem o mais próximo possível da seção de injeção visando avaliar os parâmetros U e D_L no trecho imediatamente a jusante do Distrito Industrial de Juiz de Fora; e
- Facilidade de acesso para tomada de amostras.

As distâncias entre seções avaliadas sobre a lâmina de água do Rio Paraibuna foram obtidas utilizando-se o software ArcGIS 9.3 e uma imagem digitalizada de parte de sua bacia hidrográfica.

É importante ressaltar que a seleção da seção de monitoramento S4 – Posto Policial – foi realizada em função da existência da estação fluviométrica denominada Juiz de Fora Jusante (Código 58480500). Esse fato permitiu a realização de um planejamento mais adequado dos trabalhos de campo em função da quantificação diária das vazões do Rio Paraibuna na referida seção, através de sua curva-chave. Ademais, essa informação permite cotejar as vazões avaliadas pela fluviometria e a calculada utilizando-se traçadores, estabelecendo-se assim, o desempenho desses para aquele tipo de quantificação. A curva-chave utilizada no presente trabalho é disponibilizada pela Eletronorte e a Agência Nacional de Águas (ANA), e está dada pela expressão:

$$Q = 9,54 (h + 0,05)^{1,9673}, \quad (1)$$

em que h é a leitura da régua (m) e Q é a vazão (m^3s^{-1}).

Modelo de Taylor

Para uma abordagem teórica específica que considera regime uniforme e permanente de vazões, a determinação da capacidade de transporte e dispersão de rios utiliza uma solução analítica da equação unidimensional de transporte de massa para condições de introdução instantânea do traçador (que simula o poluente lançado no rio) e regime permanente de vazões. A equação está dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (2)$$

sendo C a concentração média de traçador ($mg\ m^{-3}$), U a velocidade média de escoamento ($m\ s^{-1}$), t o tempo decorrido após a injeção de traçador (s), x é a distância entre a seção analisada e o

ponto de injeção (m) e D_L o coeficiente de dispersão longitudinal ($m^2 s^{-1}$).

A solução analítica da Equação (2), estabelecidas as condições mencionadas anteriormente, é denominada Equação de Taylor (Taylor, 1954; Bedmar, 1985), e está dada por:

$$C(x,t) = \frac{M}{2A\sqrt{\pi D_L t}} \exp\left[-\frac{(x - Ut)^2}{4 D_L t}\right], \quad (3)$$

em que M é a massa de traçador injetada (mg), A é a área da seção molhada (m^2), x é a distância entre a seção analisada e o ponto de injeção (m), e t é o tempo após injeção (s).

A Equação (3), a despeito de ter sido derivada para tubulações, tem sido utilizada com sucesso na avaliação das características de transporte e dispersão de escoamentos unidimensionais (Roldão et al., 1995). Todavia, a utilização daquela equação fica limitada às condições iniciais de injeção instantânea do traçador.

O método de ajuste por Taylor consiste em variar arbitrariamente os valores de D_L e U na Equação (3) (as demais variáveis - M , x , A e t - são conhecidas), e comparar visualmente a concentração de Taylor $C(x_{fixo}, t)$ 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 e da velocidade média.

É importante ressaltar que os parâmetros D_L e U expressam o transporte e dispersão de uma massa de “poluente” (simulada pelos traçadores) não biodegradável lançado instantaneamente no escoamento. Estes valores estão referenciados sempre à seção de injeção, isto é, eles quantificam o “transporte total” e a “dispersão total” da massa injetada na seção de lançamento até as seções de monitoramento.

Trabalhos de campo

Foram usados os traçadores fluorescentes Amidorodamina G Extra e Uranina durante as duas campanhas de campo. Com o objetivo de simplificar as atividades de campo, optou-se por realizar uma injeção instantânea de traçador, que permite quantificar os parâmetros hidrodinâmicos do escoamento de forma simples e com custos menores. A opção por injeção contínua de traçador implicaria na aquisição de equipamentos que garantissem o regime permanente da vazão injetada de traçador durante

os trabalhos de coleta de amostras nas seções de monitoramento.

As injeções instantâneas dos traçadores foram realizadas no Rio Paraíba sob a ponte da BR 040 (km 777), Distrito Industrial. A solução de corante injetada foi preparada diluindo a massa de traçador em aproximadamente 11 litros de água do rio. Os dados referentes aos traçadores utilizados, massas injetadas, horários de injeção, datas de realização das campanhas e vazões transitantes no rio, estão apresentados na Tabela 2.

Após a injeção do traçador, as equipes de monitoramento, treinadas previamente à execução dos trabalhos, movimentaram-se para suas respectivas seções de controle, conforme planejamento realizado anteriormente, com o objetivo de coletar amostras conforme as frequências pré-estabelecidas.

Tabela 2 – Dados referentes às campanhas com traçadores.

	Campanha 1 (07/10/2005)		Campanha 2 (01/12/2005)	
Traçador utilizado	Uranina	Amido	Uranina	Amido
Massa injetada (g)	300	500	516	716
Hora da Injeção (hh:mm)	05:45		05:31	
Vazão ($m^3 s^{-1}$) *	23,20		32,68	

* Vazão medida na estação fluviométrica (seção S4).

Durante a campanha de campo foi utilizado um fluorímetro Turner Modelo 10, cedido pelo Laboratório de Traçadores COPPE / UFRJ, equipado com célula de medição discreta e filtros adequados para detecção de Uranina. Este equipamento possibilitou a medição *in situ*, em tempo real da fluorescência, de amostras de água coletadas no rio, objetivando detectar o início efetivo da passagem da nuvem de traçador, bem como tomar decisões relacionadas à logística dos trabalhos em andamento referente às movimentações de componentes de equipes em função do desenvolvimento da nuvem de corantes, frequência de coleta de amostras, etc.

Foram coletadas amostras de água (volume aproximado de 100 ml) em intervalos de tempos regulares, variando entre 1 a 20 minutos, conforme o desenvolvimento hidrodinâmico para jusante da nuvem de traçador.

Estabeleceram-se duas verticais de coleta de amostras em cada seção de monitoramento, exceto para a Seção UHE Marmelos Zero, aquela situada mais a jusante do trecho pesquisado, com objetivo de comparar suas distribuições temporais de concentrações (C versus t) e, conseqüentemente, avaliar a zona de mistura, função da área sob a curva de passagem.

O total de amostras de água coletadas foram em média cinquenta, de forma a bem definir a curva de passagem de traçador em cada seção de monitoramento. As amostras foram condicionadas em recipientes de polietileno âmbar, protegidas da ação da luz solar em engradados de arame recobertos de lona (com objetivo de se evitar o fotodecomposição) e preservadas com adição de, aproximadamente, 1 ml de clorofórmio, para evitar eventual degradação biológica entre o momento da coleta da amostra no campo e o da análise em laboratório.

O princípio adotado para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos D_L e U baseiam-se no levantamento das variações temporais das concentrações de traçador em cada seção de monitoramento. A técnica consiste na injeção instantânea de um corante qualquer e a determinação da curva de passagem na seção onde se pretende medir a vazão. O cálculo é realizado considerando-se a técnica do balanço de massa, ou seja, assumindo que a massa de corante injetada no meio pesquisado se iguale àquela recuperada, mensurada através da Curva de Passagem (C versus t) pela seção de controle. Tal fato implica, adicionalmente, na garantia de que o traçador injetado seja conservativo, isto é, deve ser garantida a "imunidade" do corante no interior do meio traçado no que se refere à reação química, à adsorção ou absorção em sedimentos em suspensão, à degradação pela luz ou de qualquer espécie.

A equação de balanço de massa associada a uma injeção instantânea de corante (Bedmar, 1972) está dada pela equação:

$$Q = \frac{M_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (4)$$

em que M é a massa recuperada (mg), C_i é a concentração de traçador (mg m^{-3}), e Δt_i é o intervalo de tempo entre as coletas de amostras (s).

Trabalhos de laboratório

As amostras coletadas foram encaminhadas ao Laboratório de Traçadores da COPPE / UFRJ, onde foram analisadas no fluorímetro Turner Mo-

delo 10 (como descrito anteriormente), para determinação das concentrações de traçadores.

A determinação da concentração de traçador presente em uma amostra específica é realizada a partir da quantificação da relação linear (reta de calibração) entre concentrações-padrão de traçador previamente definidas e suas fluorescências correspondentes (L_{100}). Foram estabelecidas concentrações-padrão da ordem de 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1; 2; 3; 5; 7,5 e 10 mg m^{-3} (ppb) preparadas a partir de 20 litros de água coletada no Rio Paraíba. É importante ressaltar que antes da realização das leituras fluorimétricas, ajustou-se o pH de cada amostra para aproximadamente 7,0 utilizando concentração tampão de NaOH. Dessa forma garantiu-se o melhor desempenho dos traçadores em termos da relação pH e máxima fluorescência.

Medições espectrofluorimétricas das concentrações-padrão permitiram estabelecer a reta de calibração de cada traçador utilizado. A partir dessa informação, obtiveram-se os valores de concentração de cada amostra coletada em campo, e foram estabelecidas curvas de passagem medidas *in situ* em cada vertical monitorada.

Na Figura 3 está apresentada a reta de calibração do traçador Amidorodamina G Extra utilizada na obtenção de curvas de passagem nas seções de monitoramento da campanha 1. Observa-se na Figura 3 que 98,5% das variações da concentração de traçador são explicadas pela variação da fluorescência da amostra. Os trabalhos envolvendo traçadores fluorescentes são alvo de uma série de erros de medição associados, principalmente os erros considerados sistemáticos. Na prática é impossível eliminar completamente o erro de medição, mas é possível minimizá-lo. No presente trabalho, as medições de fluorescência foram rigorosamente controladas com o objetivo de minimizar esses erros.

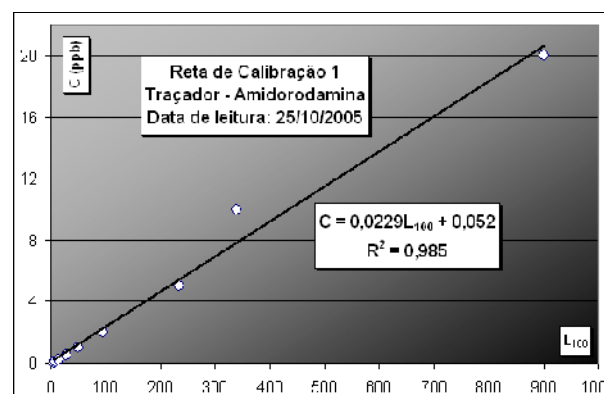


Figura 3 – Reta de calibração (Amidorodamina).

RESULTADOS E ANÁLISES

Nas Figuras 4 e 5 estão apresentadas as curvas experimentais medidas na seção Posto Policial distante 20 km de S0, onde está localizada a Estação fluviométrica Juiz de Fora Jusante (código 58480500), para as campanhas 1 (traçador Amidorodamina) e 2 (traçador Uranina), respectivamente.

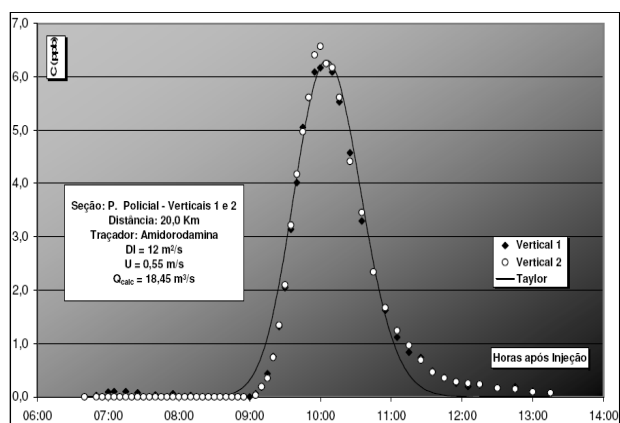


Figura 4 – Curva de Passagem de Traçador – Campanha 1.

Observa-se na Figura 4, que o melhor ajuste para os valores do coeficiente de dispersão longitudinal (D_L) e velocidade média (U), estabelecidos visualmente pelo método de tentativa e erro, foram, respectivamente, iguais a $12 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $0,55 \text{ m s}^{-1}$. A vazão calculada por meio da técnica do balanço de massa foi igual a $18,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

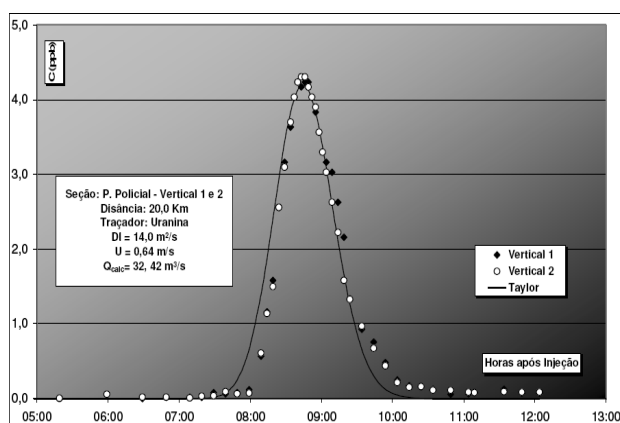


Figura 5 – Curva de Passagem de Traçador – Campanha 2.

De acordo com a Figura 5, para a campanha 2, os valores do coeficiente de dispersão longitudinal, velocidade média e vazão foram, respectivamente, $14 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $0,64 \text{ m s}^{-1}$ e $32,42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, utilizando o traçador fluorescente Uranina. O método utilizado para quantificar esses valores foi análogo ao realizado na campanha 1.

Observa-se, nas Figuras 4 e 5, que as curvas, referentes às verticais 1 e 2, estão praticamente superpostas para ambas campanhas realizadas e para os dois tipos de traçadores, indicando que a Distância de Bom Misturamento (DBM), ou zona de mistura, foi alcançada. As concentrações máximas quantificadas mostraram-se bem ajustadas pela distribuição teórica. Entretanto, devido à distribuição experimental assimétrica existente em escoamentos naturais e pelo modelo utilizado, os ramos ascendentes e descendentes não se ajustaram bem aos dados medidos.

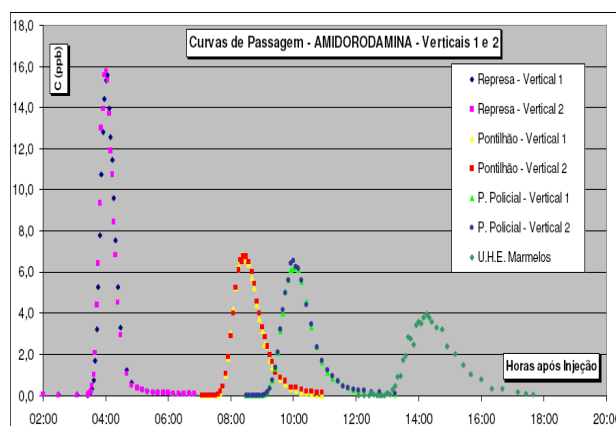


Figura 6 – Variação temporal da concentração nas seções de monitoramento (Campanha 1).

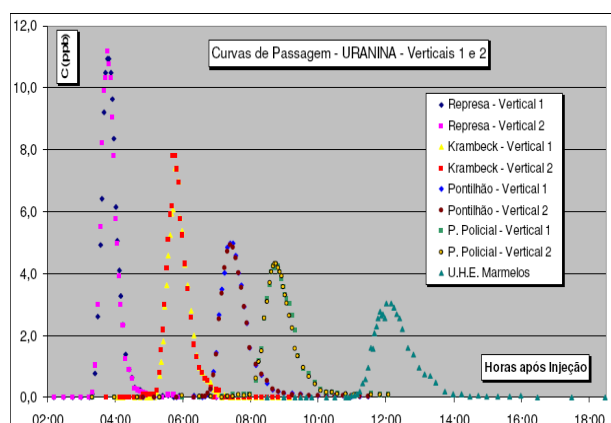


Figura 7 – Variação temporal da concentração nas seções de monitoramento (Campanha 2).

Nas Figuras 6 e 7 estão apresentadas as curvas de passagem medidas no Rio Paraibuna com os traçadores Amidorodamina e Uranina, respectivamente, nas duas verticais monitoradas.

Os resultados apresentados nas Figuras 6 e 7 permitem avaliar a distância de bom misturamento, uma vez que as concentrações dos traçadores em ambas verticais de coleta, em todas as seções de monitoramento, são praticamente idênticas. Esse fato é um dos critérios que permite a utilização do Modelo de Taylor.

Nas Tabelas 3, 4, 5 e 6, em anexo, é apresentado um resumo dos parâmetros hidrodinâmicos e das vazões calculadas utilizando as curvas de passagem de traçador, durante as duas campanhas realizadas no Rio Paraibuna, quando as vazões medidas na Estação Fluviométrica Juiz de Fora Jusante foram de $23,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $32,68 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para as campanhas 1 e 2, respectivamente.

Na Tabela 3 torna-se evidente, considerando-se as duas verticais em estudo, que o coeficiente de dispersão não apresentou variação significativa para as seções de monitoramento, exceto na seção denominada Pontilhão, onde pode-se verificar uma variação da ordem de 30% naquele valor. Esse fato pode ser explicado pelo possível derramamento de corantes observado visualmente na primeira vertical de naquela seção de monitoramento, influenciando a leitura de fluorescência do traçador Uranina. Para o traçador Amidorodamina (Tabela 4), a variação mencionada de D_L não se verificou. De acordo com Benischke (1989), o traçador Uranina é mais sensível às variações presentes em escoamentos naturais.

Com relação à velocidade média, observam-se (Tabelas 3 e 4) valores próximos obtidos para as verticais 1 e 2. De acordo com as Tabelas 5 e 6, as velocidades médias e os coeficiente de dispersão longitudinal não variaram significativamente para as seções do trecho em estudo.

As vazões avaliadas com traçadores nas seções de monitoramento também estão apresentadas nas Tabelas 3, 4, 5 e 6. Vale ressaltar que não existem equipamentos de medição de vazão nessas seções (exceto na seção do Posto Policial, onde existe a Estação Fluviométrica Juiz de Fora Jusante), e que este é um resultado possível de se avaliar com técnicas que utilizam traçadores, bastando para isso garantir que o corante utilizado seja conservativo.

Pode-se verificar igualmente, observando-se as Tabelas 3, 4, 5 e 6, que os valores de vazão calculados nas seções de controle, para as verticais 1 e 2, utilizando-se a Equação (4), não sofrem consideráveis diferenças para a campanha 1, comparando-se um traçador específico. Entretanto, o mesmo não

acontece quando se comparam os valores calculados para ambos traçadores.

A definição do traçador mais apropriado para o estudo, em termos de vazão, deverá ser feita comparando os valores calculados, pela técnica do balanço de massa, com os valores medidos em seções de controle.

Para a seção Posto Policial o valor de vazão calculado para Uranina é igual ao da curva chave, isto é, $Q = 23,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (média entre as duas verticais). Todavia, considerando-se o traçador Amidorodamina, verifica-se uma discrepância significativa no cálculo da vazão: $Q_{\text{calc}} = 18,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $Q_{\text{curvachave}} = 23,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ao se considerar os dados de vazão da Campanha 2 (Tabelas 5 e 6), o valor da vazão calculada com o traçador Uranina se aproxima bastante do valor medido pela Curva Chave: $Q_{\text{calc}} = 32,42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $Q_{\text{curvachave}} = 32,68 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Mas, para o traçador Amidorodamina verificou-se uma diferença de aproximadamente 16,5% correspondente à diferença entre $Q_{\text{calc}} = 27,30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $Q_{\text{curvachave}} = 32,68 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Foi observado visualmente durante a primeira campanha de campo, na seção Pontilhão, uma nuvem oleosa nas águas do Rio Paraibuna. Em análises posteriores, realizados no Laboratório de Traçadores usando espectrofluorímetro, observou-se uma alteração nas concentrações do traçador Amidorodamina naquela seção. A explicação para tal fato não é conhecida; pode-se apenas sugerir que se faça uma nova campanha de campo para melhor avaliar o coeficiente de dispersão na seção Pontilhão, uma vez que os resultados ficaram comprometidos.

No presente trabalho, em se tratando da determinação de D_L , os melhores resultados foram alcançados por meio do traçador Amidorodamina. Entretanto, para a determinação da vazão por meio do balanço de massa, o traçador Uranina apresentou melhores resultados.

Após a realização das duas campanhas em 2005, associadas às três campanhas realizadas em 1996, foi possível relacionar os valores dos coeficientes de dispersão (D_L) e velocidades médias (U) com as vazões transitantes (Q) em cada seção de monitoramento no Rio Paraibuna. Para isso foi feita uma regressão linear do tipo $U = a_1 Q + b_1$ e $D_L = a_2 Q + b_2$. O objetivo deste procedimento foi estimar os valores dos parâmetros hidrodinâmicos independentemente da realização de campanhas. Assim, de posse da vazão medida na estação fluviométrica, o modelo de Taylor poderá ser utilizado para se prognosticar curvas de passagem, nas diversas seções estudadas, no caso de lançamento instantâneo de um poluente conservativo no Rio Paraibu-

Tabela 3 – Comparação dos parâmetros hidrodinâmicos da campanha 1 – Uranina.

Traçador Uranina			Vertical 1			Vertical 2		
Seção	Local	Distância (km)	D_L ($m^2 \text{ s}$)	U ($m \text{ s}^{-1}$)	Q_{calc} ($m^3 \text{ s}$)	D_L ($m^2 \text{ s}$)	U ($m \text{ s}^{-1}$)	Q_{calc} ($m^3 \text{ s}$)
1	Represa	7,6	5,8	0,52	15,00	5,7	0,52	14,94
3	Pontilhão	16,0	14,0	0,53	23,00	9,3	0,53	23,39
4	P. Policial	20,0	12,0	0,55	23,30	12,0	0,55	23,07
5	UHE Marmelos	27,0	20,0	0,53	22,59	-	-	-

Tabela 4 – Comparação dos parâmetros hidrodinâmicos da campanha 1 – Amidorodamina G Extra.

Traçador Amidorodamina G Extra			Vertical 1			Vertical 2		
Seção	Local	Distância (km)	D_L ($m^2 \text{ s}$)	U ($m \text{ s}^{-1}$)	Q_{calc} ($m^3 \text{ s}$)	D_L ($m^2 \text{ s}$)	U ($m \text{ s}^{-1}$)	Q_{calc} ($m^3 \text{ s}$)
1	Represa	7,6	6,2	0,52	15,66	6,0	0,53	15,54
3	Pontilhão	16,0	11,0	0,53	19,57	11,5	0,53	18,42
4	P. Policial	20,0	12,7	0,55	18,60	11,5	0,55	18,30
5	UHE Marmelos	27,0	16,0	0,53	20,22	-	-	-

Tabela 5 – Comparação dos parâmetros hidrodinâmicos da campanha 2 – Uranina.

Traçador Uranina			Vertical 1			Vertical 2		
Seção	Local	Distância (km)	D_L ($m^2 \text{ s}$)	U ($m \text{ s}^{-1}$)	Q_{calc} ($m^3 \text{ s}$)	D_L ($m^2 \text{ s}$)	U ($m \text{ s}^{-1}$)	Q_{calc} ($m^3 \text{ s}$)
1	Represa	7,6	7,0	0,56	23,93	7,0	0,56	23,70
2	Krambeck	12,1	7,2	0,58	28,90	7,2	0,58	27,75
3	Pontilhão	16,0	11,4	0,60	31,36	11,4	0,60	31,75
4	P. Policial	20,0	14,0	0,64	32,17	13,3	0,64	32,66
5	UHE Marmelos	27,0	16,0	0,62	35,92	-	-	-

Tabela 6 – Comparação dos parâmetros hidrodinâmicos da campanha 2 – Amidorodamina G Extra.

Traçador Amidorodamina G Extra			Vertical 1			Vertical 2		
Seção	Local	Distância (km)	D_L ($m^2 \text{ s}$)	U ($m \text{ s}^{-1}$)	Q_{calc} ($m^3 \text{ s}$)	D_L ($m^2 \text{ s}$)	U ($m \text{ s}^{-1}$)	Q_{calc} ($m^3 \text{ s}$)
1	Represa	7,6	6,5	0,55	25,75	7,0	0,56	25,98
2	Krambeck	12,1	7,8	0,58	27,33	7,7	0,58	26,66
3	Pontilhão	16,0	11,1	0,60	29,07	11,1	0,60	29,62
4	P. Policial	20,0	14,8	0,63	27,30	13,3	0,64	27,30
5	UHE Marmelos	27,0	16,0	0,62	29,94	-	-	-

Tabela 7 – Coeficientes angulares, lineares e de determinação para as seções de monitoramento.

Seção	$Q \times D_L$			$Q \times U$		
	a_2	b_2	R^2	a_1	b_1	R^2
Represa	0,3633	0,7256	0,79	0,0102	0,2857	0,79
Pontilhão	0,9300	-9,4076	0,82	0,0101	0,2453	0,89
P. Policial	0,9753	-9,3825	0,90	0,0112	0,2665	0,94
UHE Marmelos	0,7232	-1,7704	0,78	0,0111	0,2603	0,98

na. A Figura 8 relaciona Vazão com Velocidade Média e, a Figura 9, relaciona Vazão com Coeficiente de Dispersão, ambas para a seção Posto Policial (Seção S3), estimadas com este método.

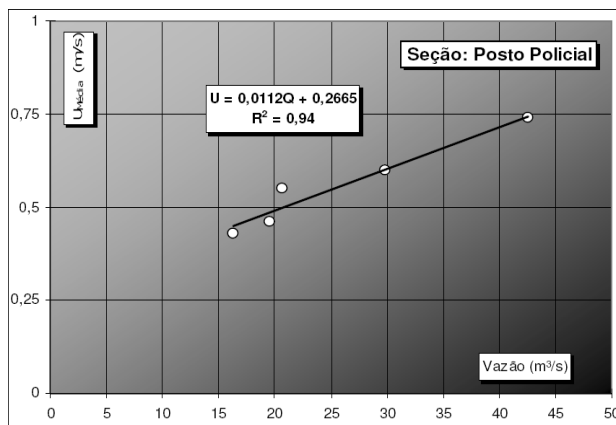


Figura 8 – Vazão versus Velocidade Média (Seção: Posto Policial).

Observa-se, na Figura 8, que o ajuste realizado pela regressão linear pode ser considerado satisfatório, uma vez que o coeficiente de determinação R^2 foi superior a 0,90. Com a equação obtida ($U = 0,0112 Q + 0,2665$) torna-se possível determinar a velocidade média de escoamento na seção Posto Policial somente com o valor associado de vazão, sem que seja preciso determinar a área transversal da seção. Este fato é fundamental e muito útil ao se estudar o regime hidráulico-hidrológico de rios por meio de modelos de qualidade de água, pois facilita os trabalhos.

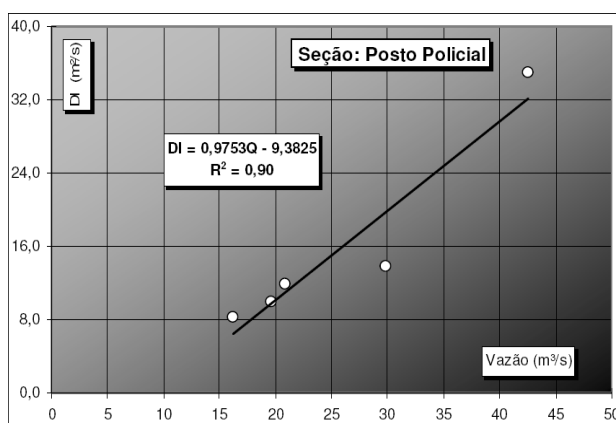


Figura 9 – Vazão versus Coeficiente de Dispersão Longitudinal (Seção: Posto Policial).

Verifica-se, na Figura 9, que a relação entre a vazão transitante e o coeficiente de dispersão longitudinal permite avaliar, para quaisquer vazões compreendidas no intervalo de estudo, as curvas de passagem de poluentes solúveis e conservativos lançados instantaneamente no Rio Paraibuna (Distrito Industrial) em quaisquer seções do trecho em estudo, desde que sejam conhecidas as quantidades lançadas.

A Tabela 7 mostra os valores de coeficientes angulares (a e c), coeficientes lineares (b e d) e coeficientes de determinação (R^2) para todas as seções de monitoramento.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As duas campanhas realizadas no Rio Paraibuna mostraram que:

1. Os traçadores Uranina e Amidorodamina G Extra mostraram-se adequados para avaliação da capacidade de transporte e dispersão do Rio Paraibuna, não interferindo na quantificação do coeficiente de dispersão, exceto para a seção Pontilhão durante a primeira campanha, quando se considera a massa recuperada no Modelo de Taylor.
2. As variações de D_L e U , com as vazões medidas na estação fluviométrica, permitem prever com o Modelo de Taylor, as curvas de passagem de poluentes solúveis e conservativos lançados instantaneamente no Rio Paraibuna, desde que sejam conhecidas as quantidades lançadas.
3. Observaram-se concordância expressiva nas características hidrodinâmicas (D_L e U) do Rio Paraibuna avaliadas *in situ* independente do traçador utilizado.
4. Considerando-se as vazões calculadas com o traçador Uranina para a campanha 1, não se observaram diferenças em relação à vazão medida pela curva-chave. Entretanto, para a campanha 2, obteve-se uma diferença percentual de, aproximadamente, 0,8% em relação à vazão medida na curva-chave (esta tomada como real), sendo esta desprezível em se tratando de estudos hidrodinâmicos.
5. Considerando-se as vazões calculadas com o traçador Amidorodamina, para as campanhas 1 e 2 verificaram-se diferenças de, aproximadamente, 20 e 16,5%, respectiva-

mente, em relação à vazão medida na curva-chave.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à pesquisa de MG – FAPEMIG, que viabilizou financeiramente a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA Jr, A. R.; SILVA, G. Q.; NEVES, B. V. (2005). *Métodos Diretos de Determinação do Coeficiente Longitudinal em Cursos d'Água Naturais. Parte 1 – Fundamentos Teóricos*. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 58(1):27-32, Jan. Mar.
- BEDMAR, A. P. (1972). *Isotopos en Hidrologia*. Ed. Alhambra, pp. 71 – 89.
- BENISCHKE, R. (1989). *Fluorescent tracers in hydrology: Principles instrumentation, physicochemical, properties, analytics*. Institute for Geothermics and Hydrology. Austria, 77 p.
- GOMEZ, H. R. (1991). *Trazadores convencionales y fluorescentes em estudios de dispersion de contaminantes em aguas superficiales*. República Argentina – Comisión Nacional de Energía Atômica de área de centrales nucleares, Buenos Aires.
- HOLLEY, E. R. (1986). *Mixing in Rivers*. Depart. an environmental and water quality operational studies technical report, e-86-11, US Army corps of engineering, 419 p.
- ROLDÃO, J. S. F.; SOARES, J. H. P. (1989). *Determinação in situ da capacidade de transporte e dispersão do Rio Paraíba do Sul no trecho Volta Redonda – Barra do Pirai* in Anais do IV Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, Lisboa, pp. 572-585.
- ROLDÃO, J. S. F.; SOARES, J. H. P.; RIGO, D. (1991). *Desempenho de traçadores fluorescentes na determinação de Coeficientes de Dispersão Longitudinal e Transversal no Rio Paraíba do Sul – RJ* in Anais do IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, ABRH, Nov. 1991, pp. 171 – 182.
- ROLDÃO, J. S. F. (1991). *Determinação in situ das velocidades médias de trânsito e coeficientes de dispersão entre Santa Cecília e a ETA do Guandu*. Projeto COPPETEC ET-150422, Relatório Final, 25 p.
- ROLDÃO, J. S. F.; SOARES, J. H. P.; PECLY, J. O. G.; LEAL, L. C. P. (1995). *Determinação da capacidade de diluição de um emissário submarino com utilização de traçador fluorescente* in Anais do XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Recife.
- SOARES, J. H. P.; RIBEIRO, C. B. M.; PAIVA, L. E. D. (1996). *Determinação in situ da capacidade de transporte e dispersão do Rio Paraíba utilizando traçadores fluorescentes* in Anais do II Congresso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- SOARES, J. H. P.; ROCHA, C. H. B.; SIQUEIRA, E. M. S.; LEAL, F. C. T.; TEIXEIRA, J. C.; PAIVA, L. E. D.; BRANCO, O. E. A.; BARBOSA, W. V. (1998). *Levantamento das condições sociais e sanitário-ambientais da parte mineira da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul*. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal MMA, Secretaria do Estado do Meio Ambiente e do Desenvolvimento Sustentável SEMAD – MG, Instituto Mineiro de Gestão das Águas IGAM – MG, Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Pesquisa e Extensão FADEPE / UFJF, p. 14.
- SOARES, J. H. P.; RIBEIRO, C. B. M. (2000). *Avaliação da Capacidade de Transporte e Dispersão do Rio Paraíba utilizando traçadores fluorescentes* in Anais do IV Congresso de Engenharia Civil – UFJF / UFRJ, Juiz de Fora, pp. 1131 – 141
- TAYLOR, G. I. (1954). *The dispersion of matter in turbulent flow through pipe*. Proc. Of Royal Society of London, v. 65, pp. 446-468.

Evaluation of the Transport and Dispersion Capacity of Paraíba River Using Fluorescent Tracers, on the Reach From the Industrial District to Marmelos HPP – Juiz de Fora/MG

ABSTRACT

This paper presents a summary of the activities developed and results obtained during studies performed to determine in situ the transport and dispersion characteristics of Paraíba River using fluorescent tracers. Two field campaigns were performed for different flows, using fluorescent dyes, Uranine or Sodid Fluorescein (Acid Yellow 73, Color Index 45350) and Amidorhodamine G Extra (Acid Red 52, Color Index 45220) injected instantaneously into the Paraíba River close to the Industrial District of Juiz de Fora. The reach studied, 27 km long, located between Industrial District I and Marmelos Zero Hydropower Plant, was monitored, collecting water samples at each of the four control sections, in order to determine the temporal variations of tracer concentrations (Passage Curves) along the river. The dispersion and transport parameters were

Avaliação da Capacidade de Transporte e Dispersão do Rio Paraibuna Utilizando Traçadores Fluorescentes.
Trecho: Distrito Industrial a UHE Marmelos – Juiz de Fora/MG

determined using the Taylor Model. Relations were established between the Dispersion Coefficient (D_L) and Mean Velocity (U) measured with the passing flows in Paraibuna River.

Key-words: Transport, dispersion, fluorescent tracers.