

## ESTUDO DA DISPERSÃO DE POLUENTES EM CURSOS D'ÁGUA NA BACIA DO RIO PARAIBUNA A PARTIR DE DESPEJOS ACIDENTAIS DE SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS PELO TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Driely Celestino da Costa<sup>1\*</sup>; Carolina Pereira do Amaral<sup>1\*</sup>; Laura Guedes Ferreira<sup>1\*</sup>; Celso Bandeira de Melo Ribeiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ESA).

\* driely.costa@engenharia.ufjf.br; carolina.amaral@engenharia.ufjf.br; laura.guedes@engenharia.ufjf.br; celso.bandeira@ufjf.edu.br

**RESUMO** – Sabe-se que a contaminação de cursos d'água pode ser advinda de diversas fontes, principalmente de caminhões de carga em rodovias por todo o país. Neste trabalho, aborda-se a carga rodoviária como fonte de despejo acidental em cursos d'água na bacia do Rio Paraibuna, bem como o comportamento do transporte e dispersão da substância química durante seu percurso nos cursos d'água. O objetivo do trabalho é realizar um mapeamento dos pontos de maior vulnerabilidade à contaminação, por despejos acidentais de cargas rodoviárias, que possam atingir e contaminar os corpos hídricos da bacia do rio Paraibuna e posteriormente simular o transporte e dispersão desses poluentes em alguns pontos na bacia. Para descrever o comportamento do transporte e dispersão do poluente, foram considerados diferentes cenários hidrológicos, isto é, vazão mínima, vazão média e vazão máxima dos pontos simulados. Espera-se que este trabalho ajude na tomada de decisões visando apoiar a criação de um plano de alerta para os usuários da bacia do Rio Paraibuna, considerando o poluente despejado.

Palavras-Chave – Dispersão, vazão, simulação.

**ABSTRACT** – It is known that the contamination of tributaries can be derived from several sources, mainly of freight trucks on highways throughout the country. In this work, the road load is addressed as a source of accidental dumping in watercourses in the Paraibuna River Basin as well as the behavior of dispersion of the chemical during its course in the watercourses. The objective of this work is to map potentially polluting activities, by accidental sewage of road transportation, and to simulate the transport and dispersion of these pollutants in the basin. To describe the behavior of the pollutant, different hydrological scenarios were considered, that are, minimum flow, average flow and maximum flow of the simulated points. It is hoped that this work will help in decision-making by creating an alert plan for users of the Paraibuna River Basin, by considering the pollutant dumped.

Keywords – Dispersion, flow, simulation.

### INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos maiores desafios da saúde pública mundial é a qualidade da água e o seu tratamento. Despejos de poluentes podem ocorrer de forma acidental ou intencional nos corpos hídricos, afetando assim todas as atividades dependentes do uso da água daquele determinado curso d'água. Esses despejos podem ter as mais variadas fontes, como efluentes domésticos e industriais e podem ser advindos da agricultura, erosão, atividades de mineração - ativos ou inativos (ROTTING, 2008), ou serem de fontes desconhecidas.

Ao mesmo tempo, há a necessidade de se desenvolver tratamentos praticáveis tecnologicamente, que sejam eficientes e economicamente acessíveis. Para isso, é necessário o reconhecimento do corpo receptor (bem como sua vazão e localização) e da fonte poluidora (seus constituintes e origem - orgânica ou química). Assim sendo, esses poluentes são transportados e tem notável participação na degradação dos recursos hídricos. Para analisar o processo de transporte e dispersão longitudinal de poluentes, em cursos d'água naturais, podem ser utilizados modelos unidimensionais (1D) (RIBEIRO et al., 2011). Para isso, são necessárias equações diferenciais e analíticas para a representação da variação temporal da concentração do mesmo, em um determinado local.

Assim, a equação da advecção-dispersão unidimensional é amplamente utilizada na previsão da qualidade de água em rios, sendo o coeficiente de dispersão longitudinal (DL) um dos parâmetros mais importantes em modelos unidimensionais (RIBEIRO, 2007). Neste sentido, são comumente utilizados os métodos dos elementos finitos e equações diferenciais ordinais para descrever o processo de transporte ambiental de massa do poluente no corpo hídrico (COSTA et al., 2015). Após a definição do modelo matemático são empregados métodos computacionais para possibilitar, então, a simulação do transporte do poluente.

Uma das principais fontes de poluição e contaminação são os despejos acidentais de poluentes solúveis em cursos d'água, que ocorrem em áreas urbanas e distritos industriais, onde se concentra uma grande quantidade de atividades antrópicas e indústrias com substâncias químicas sendo diariamente processadas e armazenadas. Outra atividade que apresenta grande potencial de ocorrência de vazamentos são os transportes rodoviários de substâncias químicas, em que, em casos de acidentes, tais substâncias podem atingir mananciais de água e consequentemente prejudicar a utilização desta pela população de diversas cidades.

Sendo assim, este estudo pretende realizar um levantamento e mapear, para toda a extensão da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, as atividades que utilizam substâncias químicas poluidoras, sobretudo aquelas relativas aos transportes rodoviários, para confecção de um mapa de vulnerabilidade espacial de contaminação de mananciais superficiais e posteriormente desenvolver um estudo de simulação hidrológica do transporte e dispersão desses poluentes, nos cursos d'água da bacia do rio Paraibuna, visando contribuir para o planejamento e tomada de decisão dos órgãos relacionados ao gerenciamento dos recursos hídricos nesta região.

## **OBJETIVOS**

Este estudo tem como objetivo realizar o georreferenciamento, em ambiente SIG dos pontos que apresentam grande potencial de despejo acidental de substâncias químicas, em cursos d'água superficiais, na bacia hidrográfica do rio Paraibuna, a partir do cruzamento do mapa de rodovias com o mapa da rede de drenagem da bacia. Pretende-se também realizar simulações do transporte e dispersão desses poluentes nos cursos d'água, a partir de equações matemáticas, considerando diferentes cenários hidrológicos, com vazões: mínima, média e máxima dos cursos d'água, nesses pontos que possuem algum risco potencial de despejo acidental de substâncias químicas.

## **METODOLOGIA**

### **Caracterização da área de estudo**

A bacia hidrográfica do Rio Paraibuna (Figura 1) apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 6.777 km<sup>2</sup>, correspondendo a 12 % da área total da bacia do Rio Paraíba do Sul. Abrange um total de 26 municípios parcial ou totalmente contidos no seu interior, sendo o de Juiz de Fora o que apresenta maior influência, com 79 % da população total da bacia (FEAM, 1996).



Figura 1 – Localização da bacia do Rio Paraíba. Fonte: RIBEIRO, C.B. Sistema de Alerta Ambiental Fundamentado em Estudo Teórico-Experimental de Transporte e Dispersão de Poluentes Solúveis em Cursos D’água, 2007.

### Determinação do mapa de vulnerabilidade espacial

Inicialmente foi gerado um mapa de vulnerabilidade espacial de risco potencial de poluição por substâncias químicas, na bacia hidrográfica do rio Paraíba, a partir de cruzamentos das principais rodovias com os principais rios da bacia, conforme apresenta a Figura 2.

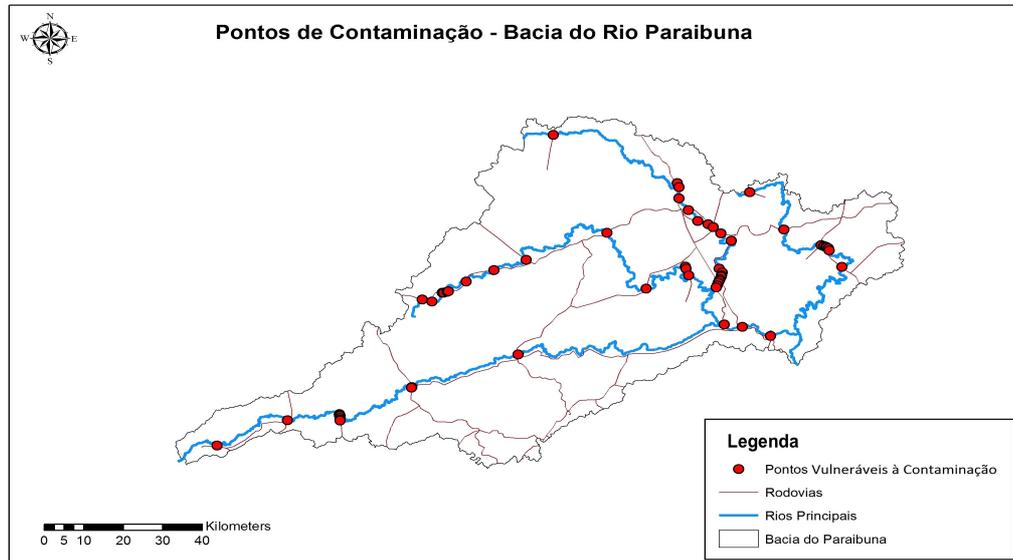


Figura 2: Pontos de maior vulnerabilidade de contaminação. Fonte: Autoria própria.

### Simulações do transporte e dispersão dos poluentes solúveis

As simulações hidráulico-hidrológicas do transporte e dispersão dos poluentes químicos solúveis, nos cursos d’água superficiais, foram realizadas utilizando equações matemáticas de transporte e dispersão de poluentes unidimensionais. Tal equação é baseada na equação de transporte de massa de uma dimensão (advecção e dispersão) dos constituintes.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde,

C – concentração média da substância  $ML^{-3}$ ; t – tempo, T;

U – velocidade média,  $LT^{-1}$ ;

$D_L$  – coeficiente de dispersão longitudinal na direção do fluxo,  $L^2T^{-1}$ ;

X e t – distancia percorrida pelo poluente, L;

$u \frac{\partial C}{\partial x}$  - transporte do poluente por advecção,  $MT^{-1}L^{-3}$ , e

$D_L \frac{\partial^2}{\partial x^2}$  - transporte do poluente por dispersão,  $MT^{-1}L^{-3}$ .

Considerando a condição inicial equivalente a uma injeção instantânea uniformemente distribuída ao longo da seção transversal (ou seja, uma quantidade de massa M concentrada num espaço de tempo infinitamente pequeno) no tempo  $t = 0$  e na origem do eixo-x, chega-se a um modelo *fickiano*, também conhecido por modelo de Taylor, dado por:

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi D_L t}} \times \frac{-(x-ut)^2}{4D_L t} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde,

C – concentração do constituinte ou poluente,  $ML^{-3}$ ;

M – massa do constituinte despejada, M;

A – área da seção,  $L^2$ ;

$D_L$  – coeficiente de dispersão longitudinal,  $L^2T^{-1}$ ; U – fluxo,  $LT^{-1}$ , e

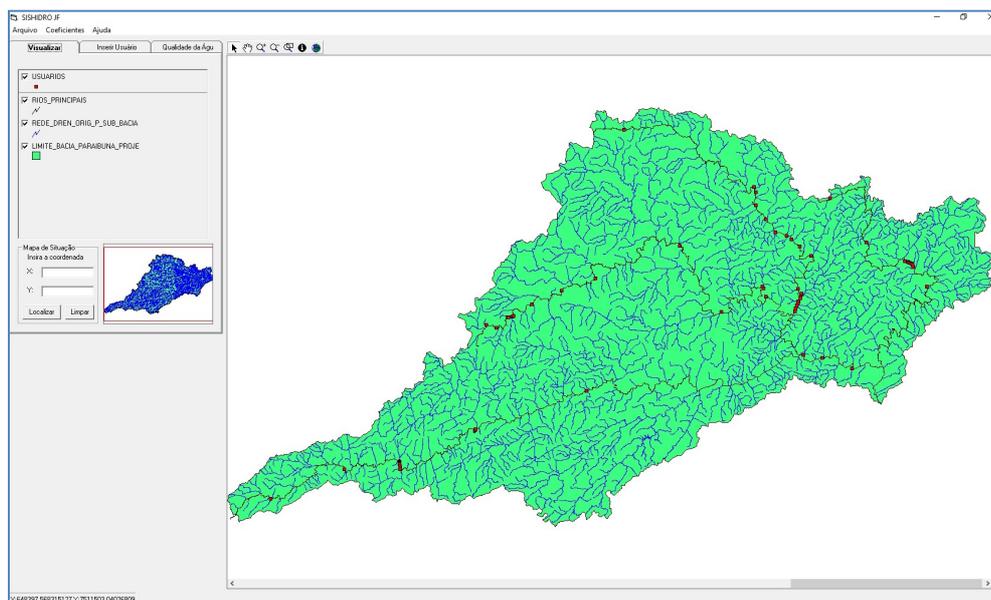
X e t - espacial (L) e temporal (T), respectivamente.

### Determinação das características hidrológicas e hidráulicas

As coordenadas dos pontos de maior vulnerabilidade foram listadas para determinação de suas vazões mínimas, médias e máximas, assim como as características hidráulicas das suas respectivas seções, como: áreas molhadas e velocidades, que podem ser visualizadas na Tabela 1, obtidas por meio do software SISHIDRO (RIBEIRO, 2011), como segue na Figura 3 abaixo.

Pontos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
<b>Vazão Média de Londo Prazo (m³/s)</b>	1.05	0.10	13.42	17.34	20.24	22.06	22.32	23.13	23.85	24.63	26.69	26.93	29.41	29.45	29.49	29.65	29.83	29.83	29.94	29.97	146.00	146.25	146.25	148.93
Área molhada (m³)	4.21	0.87	22.26	26.32	29.12	30.80	31.04	31.77	32.42	33.11	34.89	35.10	37.18	37.22	37.25	37.38	37.53	37.53	37.62	37.64	106.02	106.14	106.14	107.41
Velocidade (m/s)	0.25	0.11	0.60	0.66	0.70	0.72	0.72	0.73	0.74	0.74	0.76	0.77	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.80	0.80	1.38	1.38	1.38	1.38
<b>Vazão Q7,10 (m³/s)</b>	0.29	0.03	3.68	4.75	5.53	6.03	6.10	6.32	6.51	6.73	7.28	7.35	8.02	8.03	8.04	8.09	8.13	8.13	8.17	8.17	39.37	39.44	39.44	40.15
Área molhada (m³)	1.83	0.38	9.55	11.28	12.47	13.19	13.29	13.60	13.87	14.17	14.92	15.01	15.90	15.91	15.92	15.98	16.04	16.04	16.08	16.09	44.99	45.04	45.04	45.58
Velocidade (m/s)	0.16	0.07	0.39	0.42	0.44	0.46	0.46	0.46	0.47	0.47	0.49	0.49	0.50	0.50	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.88	0.88	0.88	0.88
<b>Vazão Qmax10 (m³/s)</b>	11.97	1.41	114.60	143.91	165.06	178.16	180.05	185.84	190.94	196.52	211.02	212.70	230.05	230.32	230.60	231.67	232.95	232.95	233.72	233.89	954.18	955.64	955.64	971.16
Área molhada (m³)	20.65	5.11	90.47	105.03	114.88	120.77	121.60	124.15	126.37	128.77	134.90	135.60	142.74	142.85	142.97	143.40	143.91	143.91	144.23	144.29	361.90	362.26	362.27	366.1
Velocidade (m/s)	0.58	0.28	1.27	1.37	1.44	1.48	1.48	1.50	1.51	1.53	1.56	1.57	1.61	1.61	1.61	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	2.64	2.64	2.64	2.65

**Tabela 1: Pontos de maior vulnerabilidade do Rio Paraibuna e suas respectivas características hidráulicas e vazões mínimas, médias e máximas, obtidas pelo software SISHIDRO. Fonte: Autoria própria.**



**Figura 3: Ilustração da Bacia do Rio Paraibuna no software SISHIDRO. Fonte: RIBEIRO, C. B. M.; REIS, G. R.; Leal, F. C. T.; LIMA, R. N. S. SISHIDRO - Sistema Hidrológico para Geração de Vazões Máximas na Região Norte de Juiz de Fora (MG), 2011.**

As larguras (B) foram estabelecidas analisando as imagens do Google Earth, tornando possível a utilização da equação da continuidade (Equação 3) para se encontrar a profundidade (H) de certa seção do Rio Paraibuna. Nesta equação foram utilizadas as vazões mínimas, médias e máximas dos pontos vulneráveis do Rio Paraibuna (Q), encontradas através do software SISHIDRO, como descrito anteriormente.

$$Q = U \times A \rightarrow Q = U \times B \times H \rightarrow H = \frac{Q}{U \times B} \quad \text{Equação (3)}$$

Com base nesses dados, tornou-se possível a utilização do software DISPERSÃO 2.1 (RIBEIRO, 2007), uma vez munidos de todos os dados de entrada necessários para se realizar a simulação de dispersão longitudinal de substâncias solúveis que tenham sofrido um despejo instantâneo em corpos hídricos. Foram selecionados três pontos de maior vulnerabilidade de ocorrência de despejo de substância tóxica solúvel devido à acidentes de transporte rodoviário no perímetro urbano da cidade de Juiz de Fora – MG, no Rio Paraibuna. Um primeiro ponto à montante no rio Paraibuna, vulnerável a esses despejos, foi selecionado para se descobrir em quanto tempo uma carga despejada neste local demandará para chegar ao primeiro ponto (ponto de entrada na cidade de JF), segundo ponto (ponto ao centro da cidade de JF) e no terceiro ponto, mais a jusante (ponto de saída da cidade de JF) do perímetro urbano da cidade de Juiz de Fora. Os pontos vulneráveis, sujeitos à despejo acidental, utilizados nesse estudo foram: P1 (Rodovia MG135 com Rio Paraibuna) – Ponto de despejo; P3 (BR 040 com Rio Paraibuna) – Ponto de entrada; P7 (Rodovia 353 com Rio Paraibuna) – Ponto ao centro; P9 (BR267 com Rio Paraibuna) – Ponto da saída. Na Tabela 2 seguem os pontos e seus respectivos dados de entrada no software DISPERSÃO 2.1.

Dados	Vazão Mínima			Vazão Média			Vazão Máxima		
	P1 - P3	P3-P7	P7-P9	P1 - P3	P3-P7	P7-P9	P1 - P3	P3-P7	P7-P9
Local do despejo:	P1 - P3	P3-P7	P7-P9	P1 - P3	P3-P7	P7-P9	P1 - P3	P3-P7	P7-P9
Substância despejada:	Poluente solúvel								
Data do despejo:	19/05/2017	19/05/2017	19/05/2017	19/05/2017	19/05/2017	19/05/2017	19/05/2017	19/05/2017	19/05/2017
Hora do despejo:	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00
Distância - Efeito do Despejo (KM):	52.9	17.3	4.5	52.9	17.3	4.5	52.9	17.3	4.5
Velocidade média no rio (m/s):	0.355	0.425	0.465	0.425	0.66	0.73	0.925	1.375	1.495
Dispersão (m2/s):	11.19	11.46	13.76	65.3	67.34	81.03	1221.6	1163.92	1385.19
Vazão a jusante (m3/s):	3.68	6.1	6.51	13.42	22.32	23.85	114.6	180.05	190.94
Massa despejada (Kg):	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Taxa de Decaimento (d-1):	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabela 2: Dados de entrada no software DISPERSÃO 2.1 para Vazão Mínima, Vazão Média e Vazão Máxima. Fonte: Autoria própria.**

Após o input dos dados no software e o cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal, que no desenvolvimento do sistema DISPERSÃO 2.1, foram implementados o método do ajuste (modelo de Taylor), da convolução e fórmulas empíricas de predição do  $D_L$ , com objetivo de avaliar o tempo de chegada e passagem da nuvem de um poluente conservativo, injetado de modo instantâneo ou contínuo, em uma seção a jusante do despejo (RIBEIRO, 2007) demonstrado na Equação 4. Nos cursos d'água naturais, os mecanismos de transporte e dispersão de poluentes são mais relevantes ao longo da direção principal do fluxo. Assim, a equação da advecção - dispersão unidimensional é amplamente utilizada na previsão da qualidade de água em rios, sendo o coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ) um dos parâmetros mais importantes em modelos unidimensionais. Além disso, a determinação do  $D_L$  por meio da equação abaixo ajustada é comprovadamente mais simples que métodos de campo que demandam mais tempo, equipamentos e técnicas especializadas (RIBEIRO, 2007).

$$D_L = 7,326 (u^*)^{0,303} (H)^{1,316} (B)^{0,445} (U)^{1,458} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde,

H = profundidade média da seção;

$u^* = g \cdot R_h \cdot S$  = velocidade de cisalhamento;

$R_h$  = raio hidráulico;

g = aceleração da gravidade;

S = declividade do leito;

B = largura da seção transversal do curso d'água;

U = velocidade de fluxo.

## RESULTADOS

Logo após o cálculo do  $D_L$ , por meio da Equação 2 a concentração do poluente pode ser determinada e obtém-se como retorno, os gráficos da dispersão da concentração do poluente ao longo do tempo. Os gráficos dos pontos da Tabela 2 seguem abaixo e como podemos observar, para a simulação do despejo no dia 19/05/2017 às 9:00 horas da manhã, com carga igual a 20 Kg de carga poluente solúvel no Ponto 1 - Rodovia MG135 com Rio Paraibuna, a dispersão da concentração desse poluente ocorrerá durante 2 dias. A dispersão da carga solúvel foi testada às mesmas condições para as vazões mínimas, médias e máximas como segue na Tabela 1, onde foram obtidos os Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3 abaixo. Analisando os gráficos, constatamos que a dispersão ocorreria de forma mais lenta e as concentrações mais elevadas do poluente quando simulado à vazão mínima; para a simulação à vazão média, o poluente manteve-se em concentrações mais baixas e a dispersão ocorreu de forma menos lenta se comparado a anterior; por fim quando simulado à vazão máxima, a dispersão ocorreu consideravelmente mais rápida e as concentrações mais baixas.

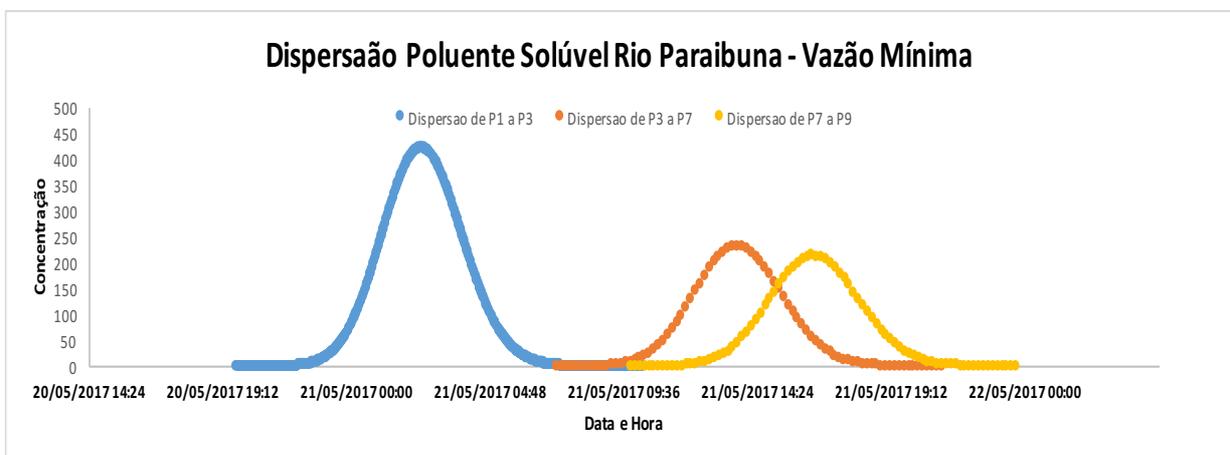


Gráfico 1: Resultado obtido no DISPERSÃO 2.1 para a dispersão do poluente à vazão mínima. Fonte: Autoria própria.

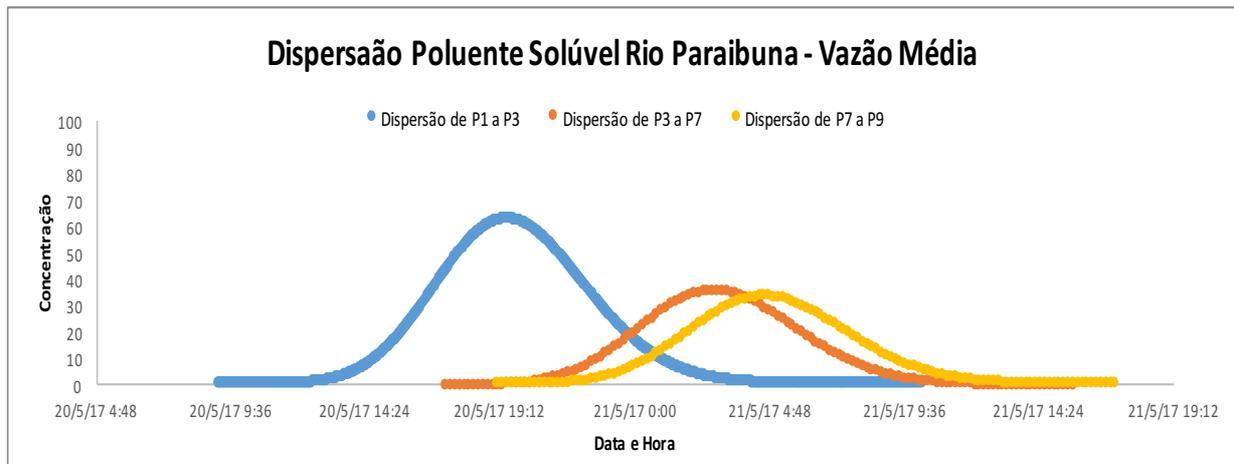


Gráfico 2: Resultado obtido no DISPERSÃO 2.1 para a dispersão do poluente à vazão média. Fonte: Autoria própria.

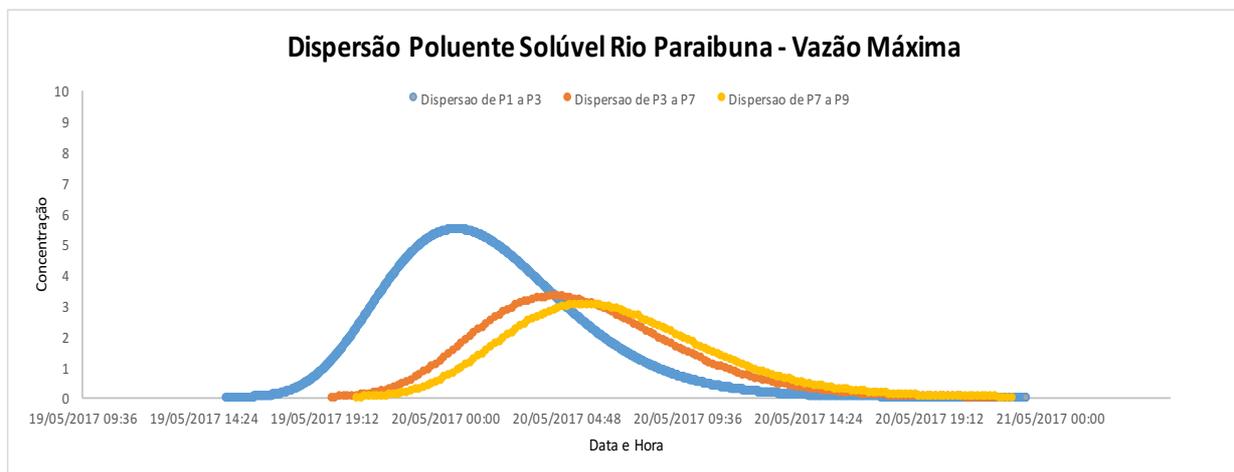


Gráfico 3: Resultado obtido no DISPERSÃO 2.1 para a dispersão do poluente à vazão máxima. Fonte: Autoria própria.

## CONCLUSÕES

Os resultados, ainda preliminares demonstraram que os programas SISHIDRO e DISPERSÃO 2.1 se mostraram adequados para simular o transporte de substâncias solúveis para diferentes condições de vazões (mínimas, médias e máximas), do rio Paraibuna. Observa-se que para todas as vazões as substâncias chegaram a maiores concentrações entre os pontos P1 e P3, para as vazões mínimas esse registro sendo aproximadamente 35 horas após o despejo, para as vazões médias o registro foi aproximadamente 24 horas, e para as vazões máximas o registro sendo em aproximadamente 6 horas após o despejo. Com base nesses resultados podemos concluir que em menores vazões, mais altas serão as concentrações de poluentes solúveis, e a sua dispersão demandará maior tempo, de acordo com as características deste corpo hídrico.

Espera-se, que este estudo possa contribuir para subsidiar a gestão dos recursos hídricos nesta bacia, sobretudo no município de Juiz de Fora, visando minimizar os prejuízos sociais e ambientais advindos dos despejos acidentais de poluentes químicos tóxicos.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.004 Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL, Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. MMA/SRH, 1997.



COSTA, D.C. et al. *Finite Element Methods for Environmental Transport Process-Wastewater Treatment Modeling: Heavy Metals Removal and Reagent Particle Size Effects*. Armour College of Engineering IIT-2015 Engineering Undergraduate Summer Research Immersion Program 33 e 83, 2015.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. *Bacia do rio Paraibuna – Enquadramento das águas. Fase1 – Proposta de enquadramento das águas do rio Paraibuna*. FEAM/DIRDA/DIPLA, Governo do Estado de Minas Gerais, 1996.

LEONARDO, P.M.S. *Aplicação de sistema de alerta em consequência de despejos de poluentes solúveis em cursos d'água*. Monografia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

MINAS GERAIS, Decreto Estadual nº 44.844, de 25 de junho de 2008, ALMG, 2008.

MINAS GERAIS, Decreto Estadual nº 47.137, de 24 de janeiro de 2017, ALMG, 2017.

RIBEIRO, B.M. *Sistema de alerta ambiental fundamentado em estudo teórico-experimental de transporte e dispersão de poluentes solúveis em cursos d'água*. Tese D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Dezembro de 2007.

RIBEIRO, B.M. et al. *Warning system based on theoretical-experimental study of dispersion of soluble pollutants in rivers*. Eng. Agríc. vol.31 no.5, 2011.

RIBEIRO, C. B. M.; REIS, G. R.; Leal, F. C. T. ; LIMA, R. N. S. *SISHIDRO - Sistema Hidrológico para Geração de Vazões Máximas na Região Norte de Juiz de Fora (MG)*. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió (AL). XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - A Água no Mundo em Transformação. Porto Alegre: ABRH, 2011.

REIS, G. R.; RIBEIRO, C. B. M. *Desenvolvimento de um Sistema de Informação para Gestão dos Recursos Hídricos*. In: XIV IWRA World Water Congress, 2011, Porto de Galinhas. XIV World Water Congress, 2011.