

CIEA

Congresso Internacional de Engenharia Ambiental
&

10ª REA

Reunião de Estudos Ambientais

ANAIS

Artigos Completos

- VOLUME 1 -

Recursos Hídricos e Qualidade da água



Organizadores

Cristiano Poletto

Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves

Guilherme Fernandes Marques

José Gilberto Dalfré Filho

**ANAIS do Congresso Internacional de
Engenharia Ambiental & 10ª Reunião de
Estudos Ambientais
Artigos Completos**

- VOLUME 1 -

Recursos Hídricos e Qualidade da água

Copyright © 2020, by Editora GFM.

Direitos Reservados em 2020 por **Editora GFM.**

Editoração: Cristiano Poletto

Organização Geral da Obra: Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Guilherme Fernandes Marques; José Gilberto Dalfré Filho

Diagramação: Juliane Fagotti

Revisão Geral: Espaço Histórico e Ambiental

Capa: Eventos Consulting Design Informática

CIP-Brasil. Catalogação na Fonte

Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Guilherme Fernandes Marques; José Gilberto Dalfré Filho (Organizadores)

ANAIS do Congresso Internacional de Engenharia Ambiental & 10ª Reunião de Estudos Ambientais – Artigos Completos – Volume 1 – Recursos Hídricos e Qualidade da Água / Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Guilherme Fernandes Marques; José Gilberto Dalfré Filho (Organizadores) – Porto Alegre, RS: Editora GFM, 2020.

573p.: il.;

ISBN 978-65-87570-08-2

CDU 502.3/.7

É AUTORIZADA a livre reprodução, total ou parcial, por quaisquer meios, sem autorização por escrito da Editora ou dos Organizadores.



SIMULAÇÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO RIO DOS SINOS/RS UTILIZANDO O MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA SIAQUA-IPH

| ID 15676 |

¹Ana Flavia Brancalion Costa, ²Fernando Mainardi Fan, ²Marcelle Gressler

1Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: anafaviabc@yahoo.com.br; 2Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: fernando.fan@ufrgs.br; 3Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: marcellegressler@gmail.com

| RESUMO |

O Brasil, principalmente nos últimos anos, tem sofrido com uma série de lançamentos acidentais de poluentes em corpos hídricos com grande potencial de afetar o abastecimento público. Neste contexto, uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão por parte dos gestores do abastecimento de água potável dos municípios é a modelagem matemática de qualidade de água, em escala de bacia hidrográfica. Os modelos de qualidade da água são representações matemáticas das interações que ocorrem nos corpos de água e podem ser utilizados na previsão do transporte de poluentes em lançamentos acidentais. Assim, este trabalho teve como objetivo simular uma pluma de sedimentos no Rio dos Sinos/RS com uso do modelo de qualidade de água SIAQUA-IPH, acrônimo para Simulador Analítico de Qualidade de Água. Para tanto, na calibração do modelo, utilizaram-se os dados de deslocamento da pluma de sedimentos provenientes de um evento hidrossedimentológico ocorrido na região do município de Rolante/RS em 2017. Na caracterização do evento simulado, os dados coletados mostraram que o município de Novo Hamburgo enfrentou cerca de três dias de interrupção do abastecimento e Campo Bom registrou uma turbidez da água no Rio dos Sinos de 10.000 uT, em contrapartida aos 100 uT aceitáveis para o tratamento de água. O modelo de qualidade de água SIAQUA-IPH emprega no cálculo do transporte de poluentes a Equação de Advecção-Dispersão, através de uma solução analítica em escala de bacia hidrográfica, destacando-se o uso do método de convolução dos polutogramas. A metodologia utilizada pelo modelo compreende cinco etapas: 1) pré-processamento de dados geoespaciais; 2) definição de atributos hidráulicos; 3) inserção de lançamentos; 4) cálculo da propagação dos poluentes; e, 5) pós-processamento e visualização dos resultados. Nesta modelagem, utilizaram-se os dados hidráulicos e hidrológicos para a bacia do Rio dos Sinos provenientes do modelo hidrológico MGB-IPH. Adotou-se uma vazão de cheia, aproximada pela Q10 simulada para esta bacia. Na calibração manual da simulação, foram variados os coeficientes de decaimento k , o coeficiente de dispersão longitudinal E_L e um coeficiente corretor de velocidades $C1$. A modelagem apresentou bons resultados principalmente em um cenário de escassez de dados e em escala de bacia, sendo calibrada para os municípios de Taquara, Campo Bom, Novo Hamburgo, São Leopoldo, Esteio e Canoas, através de dados observados acerca do tempo de chegada da pluma de sedimentos em cada município e também dos horários de interrupção do abastecimento público. Os municípios de *Taquara* e *Campo Bom* apresentaram correlação elevada entre o horário de observação da pluma e o início dos polutogramas simulados. Já em *Novo Hamburgo* e *São Leopoldo*, pôde-se observar uma correlação entre a interrupção do abastecimento e o início dos polutogramas. Finalmente, os municípios de *Esteio* e *Canoas*, apresentam uma correlação maior entre os horários de observação da pluma e o pico dos polutogramas. Considerando estas correlações, a modelagem apresentou erros de no máximo 3 horas, o que representa cerca de 4% em relação ao tempo total de simulação de 72 horas. As incertezas presentes na simulação estão ligadas



i) à imprecisão dos dados; ii) a localização das captações; e, iii) à inexistência de dados de concentração de sedimentos. Finalmente, pode-se dizer que o SIAQUA-IPH se mostrou como uma ferramenta adequada para a simulação de transporte de poluentes em escala de bacia e com pouca disponibilidade de dados, sendo mais um aliado no gerenciamento da qualidade de água pelos gestores dos serviços de abastecimento de água potável.

Palavras-chave: SIAQUA-IPH; Qualidade de água; Rio dos Sinos.

| INTRODUÇÃO |

O Brasil, principalmente nos últimos anos, tem sofrido com uma série de lançamentos acidentais de poluentes em corpos hídricos importantes para sua população. Dentre estes lançamentos, pode-se citar, em especial, os acidentes de Cataguases, Minas Gerais, em 2003, que lançou cerca de 1,2 bilhões de litros de resíduos provenientes da indústria de papel no Rio Pombo e que atingiram o Rio Paraíba do Sul no Rio de Janeiro (GONÇALVES *et al.*, 2007); e os rompimentos das barragens de Fundão em Mariana/MG (PALU; JULIEN, 2019) e Brumadinho/MG, em 2015 e 2019, respectivamente, que lançaram milhões de metros cúbicos de resíduo de mina em leitos fluviais.

Somado à ocorrência de desastres ligados intimamente com a presença antropogênica no meio, como o rompimento de barragens, alguns desastres estão conectados à eventos naturais, ainda que seus impactos sejam também afetados pela presença humana, como a ocupação de áreas inundáveis pela população. Canavesi *et al.* (2013) destacam três aspectos dos desastres e suas implicações: i) o clima, que algumas vezes atua como agente deflagrador dos desastres; ii) o meio físico em que os desastres ocorrem, suas susceptibilidades e resiliências e iii) as características sociais que a população afetada possui.

Neste contexto, encontram-se os eventos hidrometeorológicos extremos ocorridos na região do município de Rolante/RS, em janeiro de 2017, que provocaram diversas perdas econômicas, principalmente no ramo agropecuário. Além disso, na noite do dia cinco de janeiro de 2017, cerca de 300 famílias tiveram que deixar suas casas por falta de segurança (GZH, 2017a; GZH, 2017b). A cidade permaneceu ilhada por várias horas, tendo seus acessos bloqueados e o centro da zona urbana totalmente submerso. O encerramento das atividades de salvamento dos bombeiros, deu-se apenas por volta das cinco da manhã do dia seis de janeiro (SEMA; GPDEN/IPH/UFRGS, 2017).

As primeiras notícias veiculadas na mídia, apontavam o rompimento de um açude no município de São Francisco de Assis/RS, localizado ao norte de Rolante, como responsável pela enxurrada que atingiu a cidade. Entretanto, investigações mais detalhadas (SEMA;



GPDEN/IPH/UFRGS, 2017) concluíram que o alto índice pluviométrico e movimentos de terra nas encostas do Vale do Paranhana provocaram o aumento histórico do nível de água do Rio Mascaradas, afluente do Rio Rolante, que perpassa a zona urbana do município de mesmo nome.

Imagens de satélite constataram cerca de 350 cicatrizes de escorregamento na região, somando uma área afetada de aproximadamente 230 hectares. Segundo Dantas *et al.* (2010), a suscetibilidade a movimentos de terra destes terrenos provém de condições de instabilidade geomórfica. Além disso, a cabeceira do Rio Mascaradas apresenta as maiores declividades de toda a bacia do Rio dos Sinos, com até 70 graus de inclinação; assim sendo, os deslizamentos de terra que atingiram a região depositaram no canal uma grande quantidade de material sedimentar, através de fluxos de detritos, também chamados de corridas de massa (SEMA; GPDEN/IPH/UFRGS, 2017).

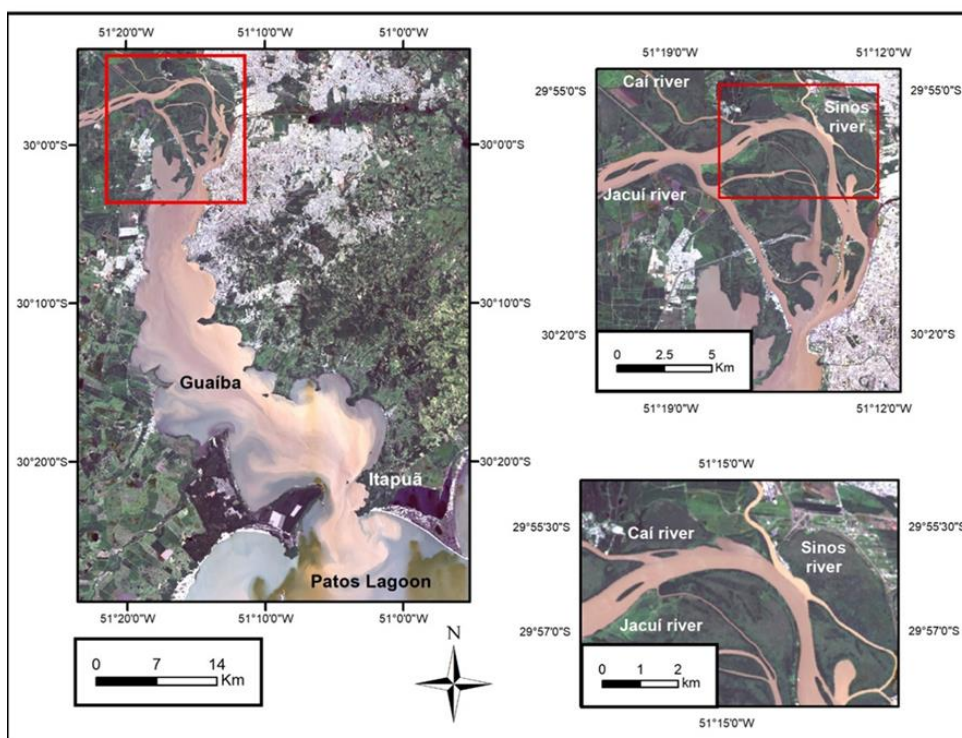


Figura 2: Mancha de Sedimentos encontra o Lagoa Guaíba (SCOTTÁ, 2017).

Os efeitos deste desastre não ficaram restritos apenas ao município de Rolante, já que o rio que atravessa a zona urbana da cidade é um dos principais afluentes do Rio dos Sinos, importante curso de água do Rio Grande do Sul. Os sedimentos provenientes dos escorregamentos afetaram a qualidade da água do Rio dos Sinos, deixando ao menos seis municípios do baixo Sinos sem água. O desabastecimento durou quase três dias em algumas localidades devido a elevada turbidez presente



no canal. Ainda, o fornecimento de energia elétrica foi interrompido em muitos locais, dificultando ainda mais a estabilização dos sistemas de abastecimento, após os eventos destacados.

A Figura 2 apresenta a mancha de sedimentos proveniente do Rio dos Sinos, quando esta atinge o lago Guaíba e que por sua vez, deságua na Lagoa dos Patos. Pode-se notar a elevada concentração de sedimentos que atingiu o maior sistema hidrológico do estado.

Neste contexto, uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão por parte dos gestores do abastecimento de água potável dos municípios é a modelagem matemática de qualidade de água, em escala de bacia hidrográfica. Chapra (1997) define os modelos matemáticos como formulações que representam a resposta física dos sistemas a estímulos externos; e em um contexto de qualidade da água, argumenta que a relação de *causa e efeito* entre *transporte e concentração* de poluentes depende de características físicas, químicas e biológicas das águas. Pode-se dizer, então, que os modelos de qualidade da água são representações matemáticas das interações que ocorrem nos corpos de água receptores e os seus respectivos poluentes.

A modelagem matemática tem sido utilizada para atender a diversas demandas da sociedade, como a previsão do transporte de poluentes em lançamentos acidentais, exemplificado pelos escorregamentos de terra que levaram sedimentos para o Rio dos Sinos, no evento descrito (GRAYMAN *et al.*, 2001; USEPA, 2017).

Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho é simular uma pluma de sedimentos no Rio dos Sinos/RS através do modelo de qualidade de água SIAQUA-IPH proposto por Fan *et al.* (2013). Para tanto, na calibração do modelo, utilizaram-se os dados de deslocamento da pluma de sedimentos provenientes dos eventos hidrológicos ocorridos na região do município de Rolante em 2017.

| MATERIAL E MÉTODOS |

SIAQUA-IPH

Para a realização da modelagem, utilizou-se o modelo SIAQUA-IPH, assim denominado por ser um acrônimo para Simulador Analítico de Qualidade de Água, que foi desenvolvido por Fan *et al.* (2013) no Instituto de pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS. Estudos sobre a aplicabilidade do modelo (FAN *et al.*, 2015), (QUINTELA; FAN, 2017) têm se mostrado interessantes em um contexto de escassez de dados.



O modelo foi acoplado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), por meio de um *plugin* ao *software* livre *MapWindow* através de linguagem VB.Net, visando a representação de impactos de lançamentos acidentais de poluentes em cursos de água na escala de bacia hidrográfica. As principais hipóteses do modelo são: i) regime permanente de vazões; ii) o escoamento considerado como unidimensional; iii) uma mistura completa e instantânea do fluxo com os contaminantes; e iv) uma seção de calha de rio retangular.

A metodologia utilizada pelo modelo compreende cinco etapas: 1) pré-processamento de dados geoespaciais; 2) definição de atributos hidráulicos; 3) inserção de lançamentos; 4) cálculo da propagação dos poluentes; e, 5) pós-processamento e visualização dos resultados

O SIAQUA-IPH utiliza a Equação Unidimensional de Advecção-dispersão, Equação (1) (CHAPRA, 1997; CHANSON, 2004) no cálculo da propagação dos poluentes; e para lançamentos instantâneos, aplica a solução analítica desta equação, Equação (2), para representar o transporte de poluentes nas redes hidrográficas (CHAPRA, 1997; CHANSON, 2004).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} + E_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc \quad (1)$$

$$c(x, t) = \frac{M}{A \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot E_L \cdot t}} \cdot \exp \left[\left(-\frac{(x - u \cdot t)^2}{4 \cdot E_L \cdot t} \right) - k \cdot t \right] \quad (2)$$

Onde c : concentração; t : tempo; u : velocidade média transversal; x : distância; E_L : coeficiente de dispersão longitudinal; k : coeficiente de decaimento ambiental do constituinte; M : massa injetada no sistema; e, A : área da seção transversal onde ocorre a dispersão longitudinal.

O coeficiente de dispersão longitudinal E_L é definido para cada um dos trechos que compõe a rede fluvial do modelo de forma distribuída. O coeficiente é estimado inicialmente por meio de um método automático de decisão com base nas características físicas de cada trecho em um banco de dados de equações empíricas, através das restrições de aplicabilidade de cada uma.

A Figura 3 apresenta um esquema da abordagem matemática utilizada pelo modelo. A primeira informação requerida na simulação diz respeito a quantidade e localização de onde foi realizado o lançamento de poluente. Na Figura 3 esse lançamento é realizado no ponto a, apresentado no *gráfico 1*); após o lançamento, o modelo calcula a propagação no tempo e espaço do poluente através da solução da equação de transporte (Equação 2). O *gráfico 2*) apresenta no ponto c, à montante da confluência, a propagação do poluente no *trecho 2*. O ponto c apresenta uma confluência entre os *trechos 2 e 3*, que são formadores do *trecho 4*; o modelo lida com as confluências através de uma diluição simples e direta, através do aumento de vazões gerado pela afluência do *trecho 3*. Assim, no *gráfico 3*) pode-se observar uma atenuação em relação ao *gráfico 2*, anterior a confluência.

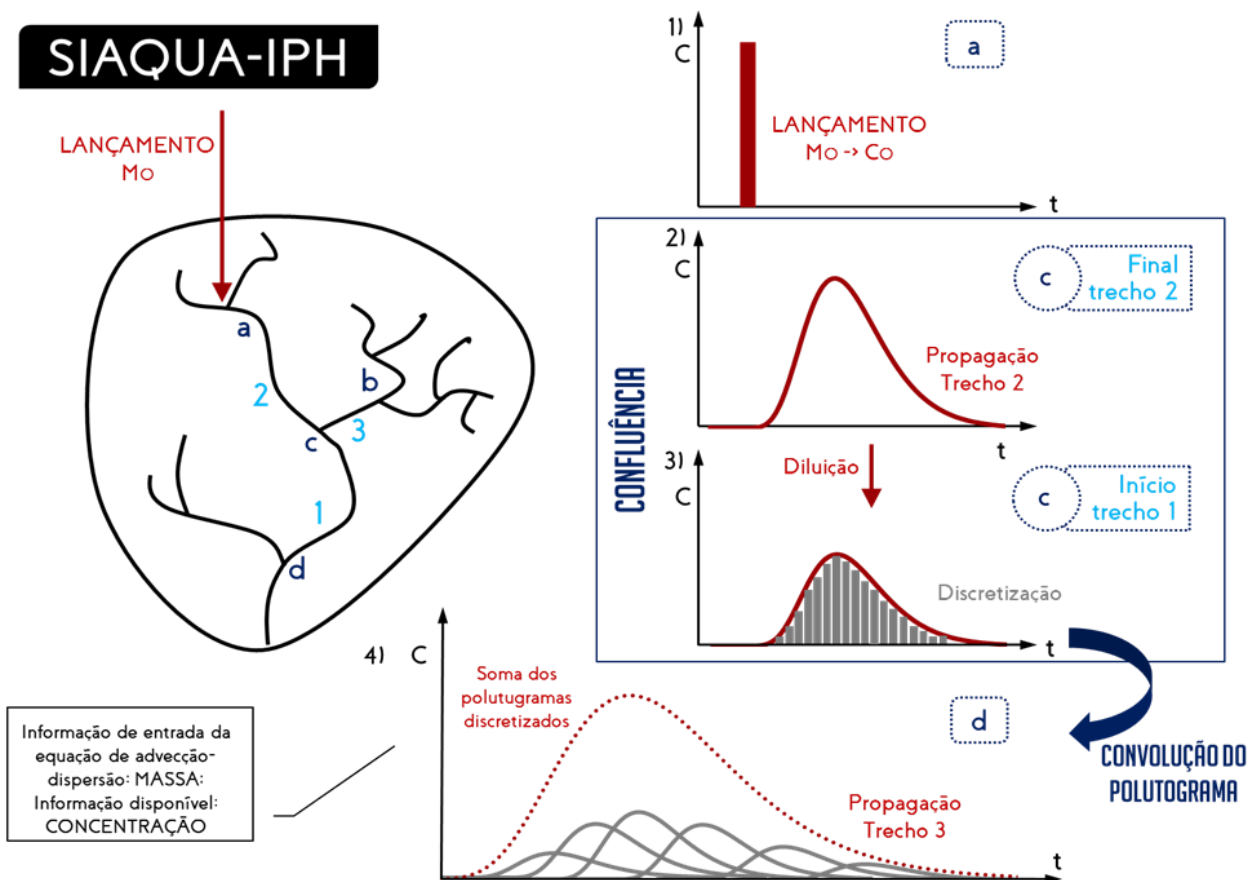


Figura 3: Esquema funcionamento SIAQUA-IPH.

O SIAQUA-IPH utiliza também a metodologia de convolução dos polutogramas (CHANSON, 2004; RIBEIRO *et al.*, 2011). Para isto, pode-se notar que no ponto c, após o procedimento de diluição, obtém-se dados de entrada para o *trecho 1* de **concentração** de poluente ao longo do tempo; porém, o dado de entrada requerido da equação de transporte (Equação 2) a ser aplicada no *trecho 1* é a **massa injetada** no sistema. Assim, para que se compatibilizem os dados de entrada bem como a informação resultante do passo anterior, o polutograma de entrada do *trecho 1* é discretizado em pequenas porções que serão transformadas em dados de massa; logo, para cada um desses novos lançamentos individuais é aplicada a equação de transporte de poluentes, assim, o polutograma resultante é a soma dos polutogramas individuais, o que pode ser observado no *gráfico 4* da Figura 3.

Mais informações acerca deste modelo podem ser encontradas em Fan *et al.* (2013) e Fan *et al.* (2015).



Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio dos Sinos, apresentada na Figura 4, está localizada no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, possui uma área de 3.800 km² e uma malha hídrica de aproximadamente 3.471 km (SCHULZ *et al.*, 2006). É uma das bacias mais importantes economicamente da região sul do país, contando com uma participação de aproximadamente 20% no PIB estadual e com uma população de mais de um milhão e trezentos mil habitantes. O rio principal desta bacia é o Rio dos Sinos, integrante da região hidrográfica do Guaíba. Com uma extensão de quase duzentos quilômetros, tem sua nascente em Caraá e sua foz no município de Canoas, onde desagua no lago Guaíba; os principais afluentes do Rio dos Sinos são o Rio da Ilha, o Rio Paranhana e o Rio Rolante (SEMA, 2014).

Dentre os trinta e dois municípios que estão integrais ou parcialmente inseridos na Bacia do Sinos, está o município de Rolante. Com uma população de quase vinte mil habitantes, segundo o último censo do IBGE (2010), o município localiza-se na encosta da Serra, no Vale do Paranhana. Os municípios de Taquara, com 54.643 habitantes; Campo Bom, com 60.074 habitantes; Novo Hamburgo, com 238.940 habitantes; São Leopoldo, com 214.087 habitantes; Esteio, com 80.755 habitantes; e Canoas, com 323.827 habitantes (IBGE, 2010) estão localizados no baixo Sinos e também são abastecidos pelo Rio principal desta bacia. Sendo assim, aproximadamente um milhão de pessoas são diretamente dependentes da qualidade de água do Rio dos Sinos.

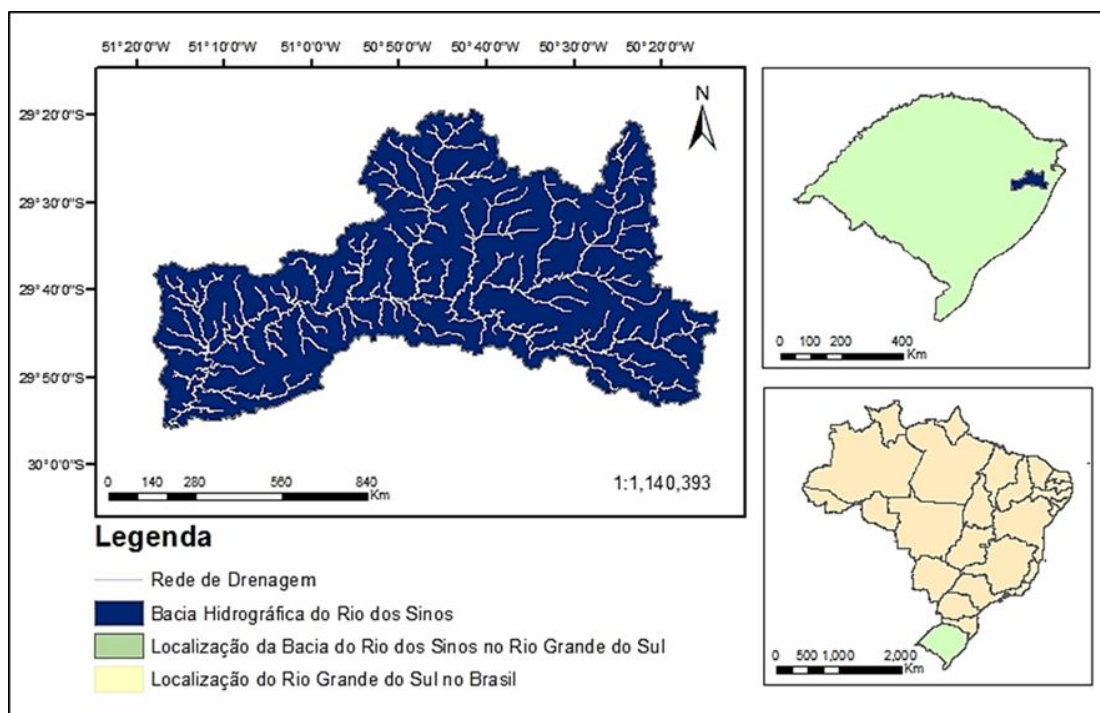


Figura 4: Bacia do Rio dos Sinos.



A maior parte destes municípios são abastecidas pela CORSAN, Companhia Estadual de Saneamento do Estado do Rio Grande do Sul. Os demais municípios têm o gerenciamento do abastecimento público vinculado diretamente às prefeituras. Entre esses, São Leopoldo tem seu abastecimento gerido pela autarquia municipal – SEMAE e Novo Hamburgo pela companhia municipal de economia mista, COMUSA. Durante o evento simulado, formou-se uma rede de comunicação entre as ETAs dos municípios de Campo Bom, Novo Hamburgo, São Leopoldo, Esteio e Canoas, para monitoramento da situação (inclusive para troca de informações técnicas); mesmo não pertencendo à mesma gestão, essa rede conseguiu monitorar e minimizar os efeitos negativos da pluma de sedimentos.

Por ser bastante urbanizada, a bacia do Rio dos Sinos sofre com os impactos humanos. Schultz *et al.* (2006) levantaram cerca de 2000 lançamentos de esgoto e 2000 pontos sem mata ciliar; e Porto e Bremer (2018) classificaram como densa a ocupação urbana nas planícies de inundação do baixo e médio Sinos e dos Rios Paranhana e Rolante, demonstrando que mais de 10 anos depois do primeiro estudo, os impactos antrópicos sobre esta bacia continuam aumentando. Porto e Bremer (2018) ainda atentam para o fato de que as áreas já urbanizadas, por sofrerem com eventos de alagamentos, inundações e escorregamentos, necessitam de obras como diques e contenções.

Caracterização do transporte de sedimentos no Rio dos Sinos

A caracterização do transporte de sedimentos, após os eventos hidrossedimentológicos – deslizamentos de terras, fluxo de detritos, inundações – ocorridos em janeiro de 2017 em Rolante/RS, é importante no entendimento da resposta do Rio dos Sinos aos tempos de condução dos sedimentos ao longo de seu curso.

Buscando-se identificar os tempos característicos do desenvolvimento da pluma de sedimentos nesta bacia, obteve-se com os sistemas de abastecimento público dos municípios localizados à jusante do lançamento, os dias e horários aproximados em que a pluma de sedimentos foi observada em cada cidade e os registros acerca de interrupção do abastecimento ocorridos nesse período devido à carga sedimentar, caso esta se mostrasse superior a capacidade de tratamento das estações.

A Figura 5 apresenta a linha do tempo dos acontecimentos da semana do dia 5 de janeiro de 2017, indicando os horários em que a carga de sedimentos foi observada em cada município e os horários de desligamento dos sistemas de captação. Em alguns municípios, a observação da pluma e a interrupção da captação deram-se de maneira simultânea. Verifica-se que, em geral, os desligamentos foram realizados logo após a observação da mancha de sedimentos.



Em *Rolante*, há a informação de que a captação de água não foi desligada em nenhum momento; porém devido aos estragos na cidade, houve a ocorrência de falta de água, devido à alta demanda nos bairros mais afetados pela enchente.

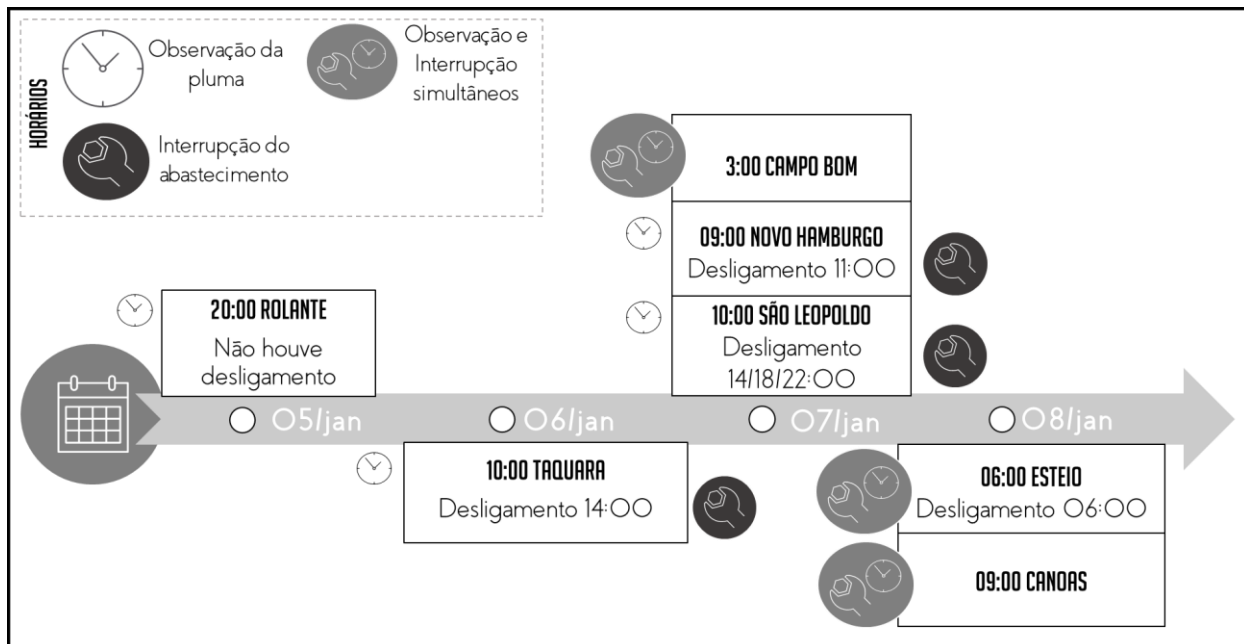


Figura 5: Linha do tempo da pluma de sedimentos no Rio dos Sinos em jan/2017.

No município de *Taquara*, o desligamento aconteceu no dia **06/jan**, aproximadamente às 14 horas e o sistema só pôde ser reestabelecido, cerca de 24 horas depois da interrupção, já no dia 07/jan.

Em *Campo Bom*, o relato é de observação da pluma e interrupção do abastecimento simultâneos no dia **07/jan** às três horas da manhã. A CORSAN do município registrou uma turbidez de 10.000 uT, uma elevação de duzentas vezes a turbidez normal do rio (G1, 2017).

Em *Novo Hamburgo*, a captação também foi desligada no sábado, dia **07/jan**, às 11h. Durante os dias seguintes foram feitas algumas tentativas infrutíferas de religação, porém, a elevada turbidez da água não permitiu a continuidade do processo; assim, a captação só foi religada definitivamente dia 10/jan no começo da manhã, somando três dias de interrupção; também há registros de queima de motores do bombeamento, causados pelos sedimentos presentes na água captada neste município.

Em *São Leopoldo*, onde há duas estações de tratamento de água e três conjuntos motor-bomba para realização da adução da água bruta; o primeiro desligamento ocorreu novamente no dia **07/jan**, às 14 horas, seguido do desligamento das demais, às 18h e 35 min e 22 horas. No dia 08/jan, 09h, foi religada um conjunto de motor-bomba para uma das ETAs. Na tentativa de ligar a segunda, pois a



turbidez já permitia trabalhar com velocidade normal no processo, não foi possível manter a qualidade, resultando novamente no desligamento para limpeza de todos os decantadores. No dia 08/jan, 23h, foi religada a segunda captação e finalmente no dia 09/jan, 17h, foi religada última bomba. A SEMAE informou que a turbidez máxima medida em uma de suas estações de tratamento de água foi de 7.200 uT, em contrapartida aos 100 uT máximos permitidos para água doce de classe 3, que ainda pode ser utilizada para o abastecimento público, após tratamento adequado, segundo a CONAMA 357 (2005).



Figura 6: Decantadores da SEMAE em São Leopoldo/RS após os desastres de Rolante/RS (fonte: SEMAE).

A Figura 6 apresenta os decantadores do sistema de abastecimento da SEMAE em São Leopoldo. Pode-se notar a quantidade de sedimentos que adentrou a estação de tratamento de água e impediu o funcionamento adequado, forçando a interrupção do abastecimento.

A captação da cidade de *Esteio* foi desligada no dia **08/jan**, aproximadamente às 6 horas da manhã e religada na noite do dia 09/jan. E em *Canoas*, a informação obtida é que o tratamento foi interrompido às 9 horas também do dia **08/jan**.

Na Figura 7, evidencia-se a localização dos municípios pertencentes à bacia do Rio dos Sinos afetados pelo transporte de sedimentos provenientes dos desastres e nos quais foram localizados dados à respeito deste evento.

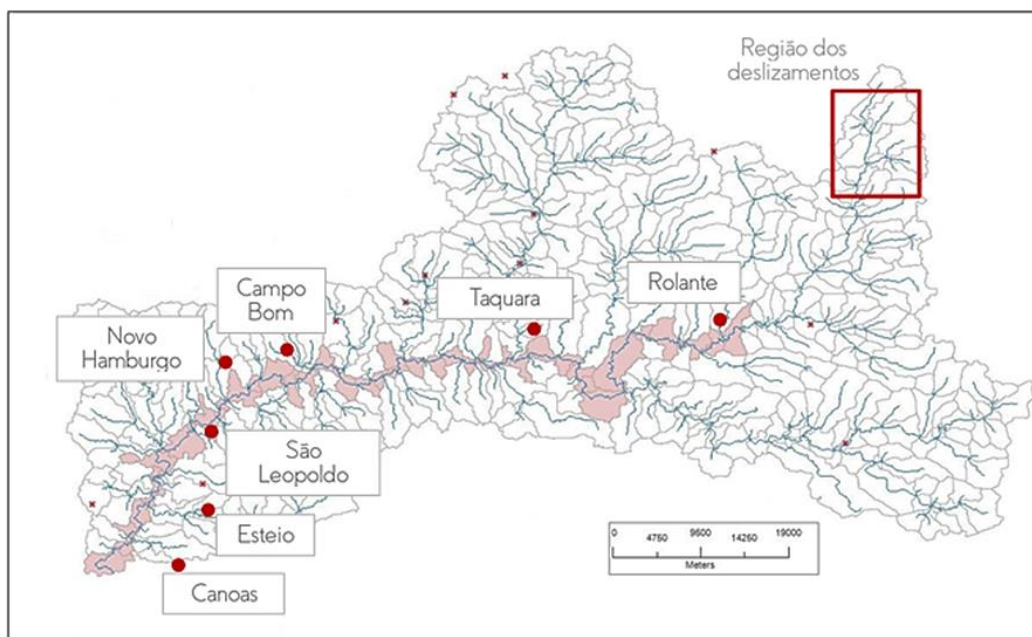


Figura 7: Municípios pertencentes à bacia do Rio Dos Sinos, em que foram relatados deslizamentos ocorridos após os desastres de Rolante em janeiro de 2017.

A Figura 7 também apresenta em destaque os trechos de rio que foram utilizados na simulação, a partir do município de Rolante/RS. Pode-se também observar a localização das cicatrizes dos deslizamentos de terra, bem ao norte da Bacia, em regiões de cabeceira.

Simulação carga sedimentar no Rio dos Sinos

A primeira parte da simulação, referente a etapa de pré-processamento de dados geoespaciais do modelo SIAQUA-IPH, deu-se com a inserção dos dados hidrológicos e hidráulicos da bacia do Rio dos Sinos no modelo. Na preparação desses dados, os trechos do rio principal afetados pela pluma de sedimentos foram quantificados em comprimento, declividade e vazões, através do modelo hidrológico MGB-IPH (COLLISCHONN *et al.*, 2007).

O modelo MGB-IPH (COLLISCHONN *et al.*, 2007) é um modelo hidrológico distribuído para a transformação de chuva em vazão nos sistemas fluviais. Este modelo é uma grande fonte de dados para modelos de qualidade de água, ao passo que pode oferecer dados simulados de vazões, velocidades do escoamento e largura da calha dos rios (FAN *et al.*, 2013). O modelo é subdividido em elementos chamados de minibacias, que compreendem a área de drenagem de cada trecho de rio. Informações mais detalhadas acerca das equações utilizadas pelo modelo podem ser encontradas em Collischonn (2001), Collischonn *et al.* (2007), Paiva (2009) e Fan (2011).



Logo, com este modelo, obteve-se o *shapefile* da rede de drenagem da bacia, subdividido em minibacias; assim como o *shapefile* dos limites dessa bacia, para melhor visualização; e, as vazões de referência, Q90, Q70, Q50, Q30 e Q10 de cada minibacia.

Na ferramenta *Dados de Bacia Hidrográfica* do SIAQUA-IPH, inicialmente foram inseridos os dados de geometria da bacia e conseqüentemente, das respectivas minibacias. A Tabela 1 apresenta um resumo das características dos dados inseridos nesta etapa. Para os dados hidráulicos, utilizaram-se as vazões de referência providas do MGB-IPH e elegeu-se trabalhar em uma situação de cheia (Q90); além disso, optou-se por uma seção retangular para a calha do rio. Por fim, estabeleceu-se um tempo de simulação de 72 horas em evento transiente.

A última etapa da modelagem baseou-se na inserção de um *lançamento de efluente*. A inserção foi realizada no trecho de rio mais próximo do centro urbano da cidade de Rolante, que foi considerada como ponto de partida da simulação (tempo zero). Essa consideração foi tomada pela inexistência de dados acerca do tempo decorrido entre os deslizamentos e a inundação do município de Rolante.

Tabela 1: Resumo dos dados geométricos da bacia.

Dados geométricos	
<i>Número de trechos simulados</i>	466
<i>Comprimento médio dos trechos [km]</i>	5
<i>Área da Bacia [km²]</i>	3.706,4
<i>Declividade média da Bacia [m/km]</i>	34,208

A Tabela 8 apresenta o resumo das características do lançamento inserido na simulação.

Tabela 2: Resumo dos dados do lançamento de sedimentos no leito fluvial.

Dados do lançamento	
<i>Massa de sedimentos M_s [kg]</i>	1.523.750.000,00
<i>Trecho de lançamento</i>	402
<i>Coefficiente de decaimento k [1/dia]</i>	0,1
<i>Coefficiente corretor de velocidades $C1$</i>	2

A massa de sedimentos foi estimada de forma bastante aproximada pela Equação (3). O volume de sedimentos mobilizado foi calculado através da área de 230 hectares atingidas por deslizamentos (SEMA; GPDEN/IPH/UFRGS, 2017), considerando-se uma profundidade de meio metro, e que cerca



de 5% destes sedimentos atingiram cursos de água e foram transportados. No evento simulado, não se têm informações sobre medições de concentração dos sedimentos, por isso, a calibração do modelo foi realizada considerando apenas os tempos de transporte da pluma.

$$M_s = \rho_s \cdot V_s \quad (3)$$

Onde: M_s : massa; ρ_s : massa específica dos sedimentos; e, V_s : volume.

Para a calibração manual da simulação, foram variados os coeficientes de decaimento k , o coeficiente de dispersão longitudinal E_L e um coeficiente corretor de velocidades $C1$. O coeficiente de decaimento e o coeficiente corretor de velocidades utilizados estão apresentados na

Tabela 2; para o coeficiente de dispersão longitudinal, escolheu-se a função do modelo que seleciona em uma base de equações empíricas a mais adequada para cada trecho do rio e a aplica.

Tabela 3: Horário de chegada da pluma de sedimentos nas cidades do baixo Sinos.

<i>Cidade</i>	<i>Data</i>	<i>Hora [h]</i>
<i>Rolante</i>	05/01/2017 20:00	0
<i>Taquara</i>	06/01/2017 10:00	14
<i>Campo Bom</i>	07/01/2017 03:00	31
<i>Novo Hamburgo</i>	07/01/2017 09:00	37
<i>São Leopoldo</i>	07/01/2017 10:00	38
<i>Esteio</i>	08/01/2017 06:00	58
<i>Canoas</i>	08/01/2017 09:00	61

A Tabela 3 apresenta os dados coletados sobre a data e horário que os sedimentos provenientes do evento foram observados nas cidades à jusante dos deslizamentos de terra. Adotando-se a cidade de Rolante como o local de início do transporte da pluma, os sedimentos demoraram cerca de 60 horas para atingir a cidade mais próxima da foz do Rio dos Sinos, Canoas.

| RESULTADOS E DISCUSSÕES |

A Figura 8 e a Tabela 4 apresentam os resultados da simulação do modelo SIAQUA-IPH o evento relatado.

Para o município de *Taquara*, onde a Tabela 4 mostra que a pluma começou a ser observada **14 horas** após a enchente em Rolante, o polutograma da simulação, Figura 8 a), também tem seu



início aproximadamente **14 horas** após o lançamento, tendo seu pico de concentração aproximadamente entre 16 e 18h após o lançamento.

Em *Campo Bom*, a Tabela 4 mostra uma observação da pluma de sedimentos cerca de **31 horas** após os eventos, e o polutograma da simulação, Figura 8 b), apresenta seu início, aproximadamente **32 horas** após o lançamento, com seu pico, cerca de 4 horas depois.

Já para *Novo Hamburgo* e *São Leopoldo*, os polutogramas, Figura 8 c) e d), respectivamente, mostraram um pequeno atraso para o início da pluma de sedimentos, pois segundo os dados da Tabela 4 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a pluma teria sido observada 37 e 38 horas após o lançamento; porém, os horários de interrupção do abastecimento se deram em **39 e 42 horas**, o que condiz com os polutogramas que apresentaram um início de concentração de sedimentos entre **39 e 40 horas e 42 horas** depois do lançamento, respectivamente. O pico de concentração para estes municípios foi em aproximadamente 44 e 46 horas de simulação.

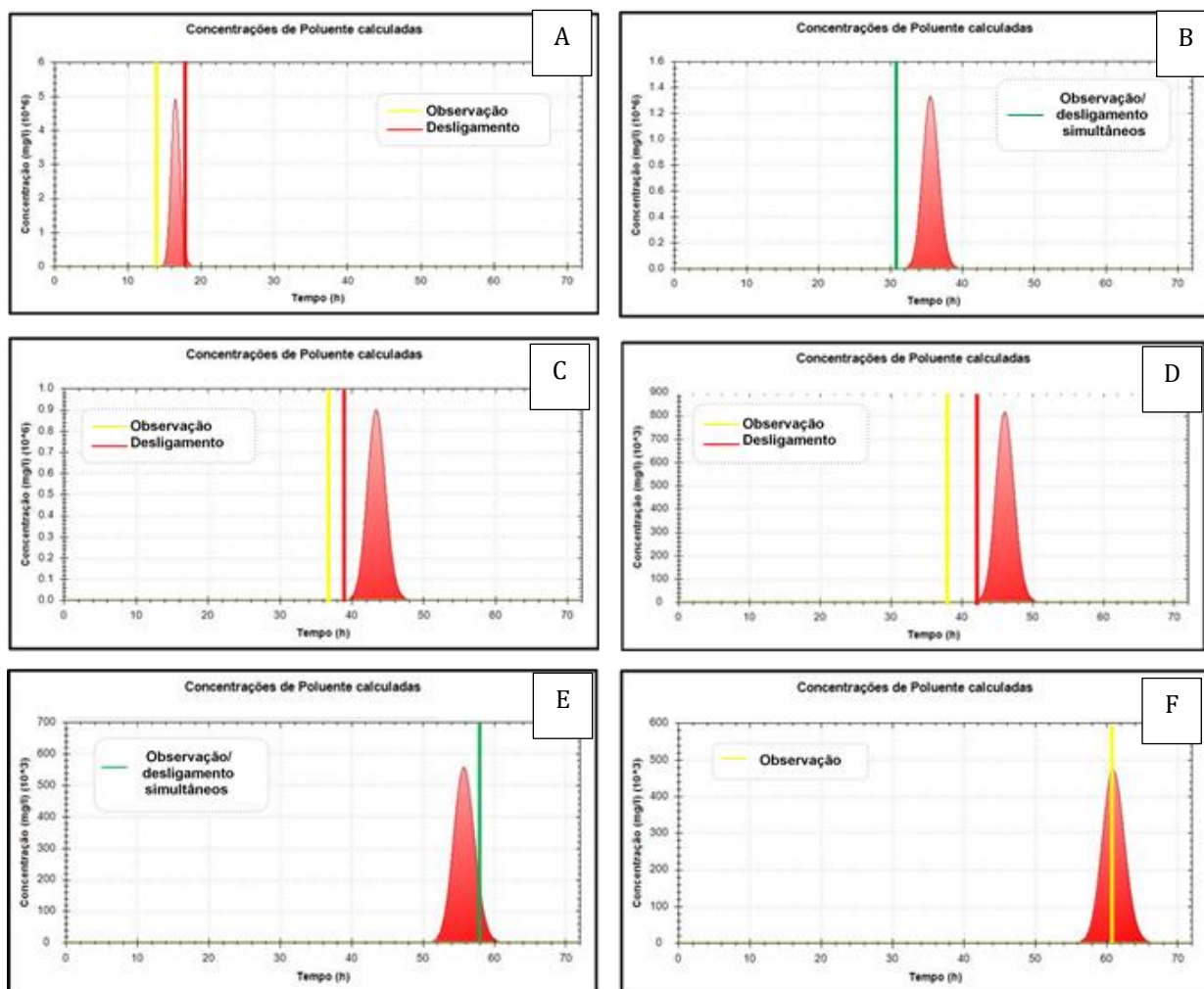


Figura 8: Polutogramas do transporte de sedimentos no Rio dos Sinos: a) Taquara; b) Campo Bom; c) Novo Hamburgo; d) São Leopoldo; e) Esteio e f) Canoas.



Tabela 4: Comparação dos dados observados e o resultado da simulação.

Cidade	Observação da pluma [h]	Interrupção do abastecimento [h]	Início do polutograma simulado [h]	Pico o polutograma simulado [h]
Taquara	14	18	14	16 - 18
Campo Bom	31	-	32	35 - 36
Novo Hamburgo	37	39	39 - 40	43 - 44
São Leopoldo	38	42	42	46
Esteio	58	-	51 - 52	55 - 56
Canoas	61	-	56	61

A Figura 8 e) e f) apresenta os resultados da simulação para os municípios de *Esteio* e *Canoas*, onde os dados de observação da pluma de sedimentos (desligamentos das captações), apresentados na Tabela 4 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, mostram-se mais aproximados aos tempos de início e pico dos polutogramas de sedimentos. As captações foram desligadas **58 e 61 horas** após o lançamento, enquanto que os polutogramas mostram um tempo de pico de concentração em **56 e 61 horas**, respectivamente; já o início do desenvolvimento da pluma do polutograma, se dá em 52 e 56 horas, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta de forma resumida as diferenças horárias entre os dados observados e o resultado da simulação. Pode-se notar três correlações interessantes.

Tabela 5: Resumo dos erros horários entre as observações e a simulação

Cidade	a) Δ (Observação da pluma / Início do polutograma) [h]	b) Δ (Observação da pluma / Pico do Polutograma) [h]	c) Δ (Interrupção do abastecimento / Início do Polutograma) [h]	d) Δ (Interrupção do abastecimento / Pico do Polutograma) [h]
Taquara	0	2 - 4	4	0 - 2
Campo Bom	1	5 - 4	-	-
Novo Hamburgo	2 - 3	6 - 7	0 - 1	4 - 5
São Leopoldo	4	8	0	4
Esteio	7 - 6	2 - 3	-	-
Canoas	5	0	-	-



A primeira, para os municípios de *Taquara* e *Campo Bom*, está relacionada ao horário de observação da pluma e o início do polutograma, Tabela 5 – coluna a), onde as diferenças são de no máximo 1 hora. Já nos municípios de *Novo Hamburgo* e *São Leopoldo*, pode-se observar uma correlação entre a interrupção do abastecimento e o início dos polutogramas, Tabela 5 – coluna c); onde, novamente as diferenças entre essas grandezas são de no máximo 1 hora. E, por fim, os municípios de *Esteio* e *Canoas*, apresentam uma correlação maior entre os horários de observação da pluma e o pico dos polutogramas, Tabela 5 – coluna b), com uma diferença máxima de cerca de 3 horas.

Com base nessas correlações e, ainda, considerando que a simulação teve um tempo total de 72 horas, os erros máximos obtidos nessa simulação foram de aproximadamente 4%. Porém, ainda que se observassem todas as correlações entre os horários de observação/interrupção do abastecimento e início/pico dos polutogramas, apresentadas na Tabela 5, a maior diferença obtida seria entre a observação e o pico do polutograma para a cidade de São Leopoldo. Essa diferença de 8 horas representaria cerca de 11% de erro em relação ao total de tempo simulado. Para a simulação de um evento com uma restrição tão grande de dados, consideram-se os resultados bastante satisfatórios.

Para as correlações encontradas entre os tempos de observação/interrupção e os tempos de início/pico dos polutogramas, pode-se listar algumas possíveis explicações. Uma delas é que as cidades mais próximas da foz do Rio dos Sinos, como Esteio e Canoas, receberam uma quantidade menor de sedimentos, visto que grande parte do lançamento já havia se dispersado, assim sendo, os problemas para as captações deram-se a partir das concentrações de pico dos sedimentos, ao contrário das cidades mais próximas de Rolante, as quais, logo na chegada da pluma de sedimentos, já percebiam uma grande concentração dos mesmos.

Outra explicação diz respeito à qualidade da informação obtida, já que alguns registros foram feitos de forma bastante aproximada pelos funcionários das estações de tratamento de água e não se tem como precisar se estes dados se referem a observação da pluma nas cidades ou apenas ao momento de desligamento das captações.

Finalmente, os polutogramas foram plotados nos trechos de rios, mais próximos dos centros urbanos das cidades listadas, porém, não se tem informação exata da localização das captações, podendo assim, estarem localizadas em trechos diferentes dos que foram utilizados na simulação.

Um ponto importante a se ressaltar, é que os municípios localizados mais perto da foz do Rio dos Sinos tiveram seu abastecimento de água afetado por um período maior de tempo, o que condiz com os polutogramas gerados para estes cenários, pois nestes gráficos a pluma, apesar de se mostrar



com uma concentração menor, apresentou uma duração de tempo maior que nos polutogramas dos municípios mais próximos do lançamento.

Os resultados referentes às concentrações não puderam ser calibrados pela inexistência de dados observados para este parâmetro e, por isso, não são discutidos.

O desabastecimento, relacionado ao evento simulado por este trabalho, pode ter afetado também outros municípios não destacados aqui; porém, ou estes municípios não possuíam dados sobre o evento ou não foi possível contato com as respectivas estações de tratamento de água.

E, finalmente, na elaboração do estudo, notou-se a necessidade de um monitoramento mais efetivo das condições de qualidade de água desta Bacia, responsável pelo abastecimento de mais de um milhão de pessoas, pois a disponibilidade de dados de qualidade de água é quase remota.

| CONSIDERAÇÕES FINAIS |

O modelo de qualidade de água SIAQUA-IPH foi utilizado na modelagem do evento hidrossedimentológico ocorrido em janeiro de 2017, nas encostas do Vale do Paranhana, ao norte da cidade de Rolante no Rio Grande do Sul, o qual transportou sedimentos até o Rio Rolante, que atingiram o Rio dos Sinos e se propagaram pela bacia, a partir dos dados de observação referentes aos desligamentos das captações de água dos municípios do baixo Sinos.

Os tempos de viagem da pluma de sedimentos foram calibrados para as cidades de Taquara, Campo Bom, Novo Hamburgo, São Leopoldo, Esteio e Canoas.

Os municípios de *Taquara* e *Campo Bom* apresentaram correlação entre o horário de observação da pluma e o início do polutograma com diferenças de no máximo 1 hora. Já em *Novo Hamburgo* e *São Leopoldo*, pôde-se observar uma correlação entre a interrupção do abastecimento e o início dos polutogramas, onde, novamente as diferenças foram de no máximo 1 hora. Finalmente, os municípios de *Esteio* e *Canoas*, apresentam uma correlação maior entre os horários de observação da pluma e o pico dos polutogramas, com uma diferença máxima de cerca de 3 horas. Considerando as correlações e o tempo total de simulação, a modelagem apresentou erros de cerca de 3%, além de que, considerando todas as relações, o erro foi de no máximo 11%.

Assim, pode-se dizer que o resultado da simulação foi bastante positivo em um contexto de escassez de dados e escala de bacia hidrográfica.

Algumas das fontes de incerteza da simulação dizem respeito aos dados que foram obtidos com funcionários das companhias de saneamento com precisão não identificada; à localização das captações, em que se utilizou o local mais próximo do centro urbano das cidades e pode diferir da



localização real das mesmas; além da inexistência de dados de concentração de sedimentos, para os quais não foi possível realizar a calibração.

Por fim, pode-se citar que ademais dos municípios utilizados na calibração deste trabalho, outras cidades pertencentes à bacia do Rio dos Sinos podem ter sofrido consequências relacionadas a este evento. Entretanto, não foi possível localizar dados referentes a este evento e por isso não foram mencionados nessa pesquisa.

Finalmente, pode-se dizer que o SIAQUA-IPH mostrou-se como uma ferramenta adequada para a simulação de transporte de poluentes em escala de bacia, mesmo com pouca disponibilidade de dados, sendo mais um aliado no gerenciamento da qualidade de água pelos gestores dos serviços de abastecimento.

Agradecimentos

A primeira autora gostaria de agradecer o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo apoio recebido.

| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS |

- Canavesi, V., Camarinha, P. I. M., Algarve, V. R., Carneiro, R. L. C., & Alvala, R. C. S. 2013. Análise da susceptibilidade a deslizamentos de terra: estudo de caso de Paraibuna, SP. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5251-5258.
- Chanson, 2004. Environmental hydraulics of open channel flows. London: Butterworth-Heinemann. 483 p.
- Chapra, S.C. 1997. Surface Water-Quality Modeling. McGraw-Hill International Edition, New York, 844.
- Collischonn, W., Allasia, D., Da Silva, B. C., & Tucci, C. E. 2007. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 878-895.
- Collischonn, W. 2001. Simulação hidrológica de grandes bacias.
- CONAMA. 2005. 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, 357.
- Dantas, M. E.; Viero, A. C.; Silva, D. R. A. 2010. “Origem das Paisagens”, in Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul. Org. por Viero, A. C. & Silva, D. R. A. ed. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Porto Alegre/BR, pp. 35-50.
- Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Collischonn, W., Ames, D. P., Rigo, D. 2015. Large-scale analytical water quality model coupled with GIS for simulation of point sourced pollutant discharges. *Environmental Modelling software*, 64, 58-71.
- Fan, F. M.; Collischonn, W.; Rigo, D. 2013. Modelo analítico de qualidade da água acoplado com Sistema de Informação Geográfica para simulação de lançamentos com duração variada. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, p. 359-370.



- Fan, F. M. 2011. Acoplamento entre SIG e modelos hidrológicos: Integração do modelo MGB-IPH. Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Gonçalves, J.B.; Almeida, J.R.; Lins, G.A. 2007. Uma análise crítica do acidente em Cataguases-MG, 2003. Revista Ciências do Ambiente On-Line, v.3, n. 2, 9 p.
- Grayman, W. M.; Deininger, R. A.; Males, R. M. 2001. Design of early warning and predictive source-water monitoring systems. American Water Works Association.
- GZH, 2017a. "90% do gado foi levado pelo rio", estima coordenador da Defesa Civil de Rolante." Porto Alegre, RS. 06/01/2017. Disponível em <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2017/01/90-do-gado-foi-levado-pelo-rio-estima-coordenador-da-defesa-civil-de-rolante-9142833.html>
- GZH, 2017b. "Enchente deixa famílias ilhadas e interdita rodovia em Rolante." Porto Alegre, RS. 06/01/2017. Disponível em <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2017/01/enchente-deixa-familias-ilhadas-e-interdita-rodovia-em-rolante-9138632.html>
- G1, 2017. "Lama de enchente deixa oito cidades sem água no vale do Rio dos Sinos". RS. 08/01/2017. Disponível em <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2017/01/lama-de-enchente-deixa-oito-cidades-sem-agua-no-vale-do-rio-dos-sinos.html>
- IBGE. IBGE CIDADES@, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 11/08/2019.
- Paiva, R. C. D. D. 2009. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias estudo de caso: bacia do rio Solimões.
- Palu, Marcos C.; Julien, Pierre Y. 2019. Modeling the Sediment Load of the Doce River after the Fundão Tailings Dam Collapse, Brazil. Journal of Hydraulic Engineering, v. 145, n. 5, p. 05019002.
- Porto, D. T., & Bremer, U. F. 2018. Interfaces entre planejamento territorial e gestão de risco de desastres na bacia hidrográfica do rio dos sinos, estado do rio grande do sul, brasil. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, (32), 82-97.
- Quintela, R. S., & Fan, F. M. 2017. Estudo de aplicação preliminar do modelo SIAQUA-IPH para dispersão longitudinal de sedimentos em rios resultantes de rompimentos de barragens de rejeitos. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). Anais [recurso eletrônico]. [Porto Alegre: ABRH, 2017].
- Ribeiro, C.B.M.; Silva, D. D.; Soares, J.H.P.; Guedes, H.A.S. 2011. Warning system based on theoretical-experimental study of dispersion of soluble pollutants in rivers. Engenharia Agrícola [online], v. 31, n. 5, p. 985-997.
- Scottá, F. Mancha de Sedimentos encontra o Lagoa Guaíba [sem título]. 2017. 1 fotografia.
- Schulz, U.H.; Nabinger, V.; Gomes, L.P. 2006. Relatório final do Projeto Monalisa. São Leopoldo, RS. Comitê de gerenciamento da bacia do Rio dos Sinos - COMITESINOS, 18p.
- SEMA; GPDEN/IPH/UFRGS. 2017. Diagnóstico preliminar. Departamento de Recursos Hídricos da SEMA e Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais do IPH/UFRGS. Porto Alegre: DRH/SEMA, 26p.
- SEMA. Consórcio Público de Saneamento Básico da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos. Plano de Bacia. 2014. Disponível em: <http://www.prosinos.rs.gov.br/planos-e-acoes/plano-de-bacia>. Acesso em 05 jan/2020
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. 1994. Water Quality Standards Handbook, 2nd ed., Technical Report EPA-823-B-94-005a, Office of Water, USEPA, Washington, DC.